

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**ANÁLISE DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR DE  
FUNDIÇÃO CONTÍNUA ABNT FE-50007**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE DE SANTA CATARINA PARA  
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**CÍCERO GALLINA DE AGUIAR**

**FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 1999**

ANÁLISE DA USINABILIDADE DO FERRO FUNDIDO NODULAR DE  
FUNDIÇÃO CONTÍNUA ABNT FE-50007

CÍCERO GALLINA DE AGUIAR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO  
TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA - ÁREA DE CONCENTRAÇÃO  
FABRICAÇÃO - E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO

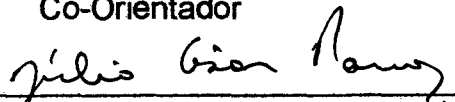


Prof. Lourival Boehs, Dr.

Orientador

Prof. João Carlos E. Ferreira, PhD.

Co-Orientador



Prof. Júlio César Passos, Dr.

Coordenador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Henrique Ahrens, Dr.

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, Dr.

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Lourival Boehs, pela orientação e apoio prestados, direta e indiretamente ligados a este trabalho.

Ao Prof. João Carlos E. Ferreira pela co-orientação e também pelas várias sugestões apresentadas, as quais foram de grande valor.

Ao Eng. Pesq. Delmonte N. Friedrich, pela colaboração na revisão e edição deste trabalho.

À Indústria de fundição Tupy, pela doação do material utilizado nos testes de usinagem.

Aos senhores Dilson e Amauri, da Indústria de fundição Tupy Ltda, Joinville, Santa Catarina, por terem colaborado com este trabalho.

À Sandvick do Brasil, pela doação das ferramentas.

Ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, pela disponibilidade de equipamentos de seus laboratórios.

Aos técnicos, laboratoristas e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC pelos serviços prestados.

À minha esposa Luizete, pela dedicação e carinho constantes, sem os quais não teria tido forças e paciência necessárias à execução de um trabalho desta natureza.

Aos meus filhos Giordano e Anjiuli, pela constante motivação e amizade.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>SIMBOLOGIA.....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XIV</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XV</b>
 <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	 <b>1</b>
 <b>CAPÍTULO 2 - A FUNDIÇÃO CONTÍNUA E SEUS PRODUTOS.....</b>	 <b>3</b>
2.1- Fundição Contínua.....	3
2.1.1 - Vantagens da fundição contínua .....	4
2.2 - Ferro Fundido Nodular .....	7
2.2.1- Definição .....	7
2.2.2 - Microestrutura .....	8
2.2.3 - Forma da grafita.....	8
 <b>CAPÍTULO 3 - USINABILIDADE – DESGASTE DE FERRAMENTA E</b>	
<b>FORÇAS DE CORTE.....</b>	<b>9</b>
3.1 - Definições .....	9
3.1.1 - Desgaste e vida da ferramenta .....	10
3.1.2 - Causas de desgaste.....	11
3.1.3 - Critérios para a determinação do fim de vida da ferramenta.....	13
3.1.3.1 – Análise da usinabilidade através dos desgastes da ferramenta.....	15
3.1.3.2 – Análise da usinabilidade através das forças de corte.....	18



<b>CAPÍTULO 4 - USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS .....</b>	<b>23</b>
4.1 - Influência da Microestrutura na Usinabilidade dos Ferros Fundidos.....	24
4.2 - Influência da Composição Química na Usinabilidade dos Ferros Fundidos.....	27
 <b>CAPÍTULO 5 - MATERIAIS DE FERRAMENTAS EMPREGADAS NA</b>	
<b>USINAGEM DE FERRO FUNDIDO.....</b>	<b>29</b>
5.1- Metal Duro e Carbonetos Revestidos .....	29
5.2 - Cermet .....	30
5.2.1 – Observação Prática dos Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Cermet.....	31
5.3 - Cerâmica.....	32
5.3.1 – Mecanismos de desgaste das Cerâmicas .....	35
 <b>CAPÍTULO 6 - METODOLOGIA, CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E</b>	
<b>EQUIPAMENTOS.....</b>	<b>37</b>
6.1 - Metodologia.....	37
6.2 - Caracterização dos Materiais.....	38
6.2.1 - Ferro fundido nodular ABNT FE-50007 .....	38
6.2.2 - Aço ABNT 1045 .....	48
6.3 - Equipamentos Utilizados nos Ensaios .....	48
6.4 - Calibração do Dinamômetro de Kistler.....	49
 <b>CAPÍTULO 7 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>50</b>
7.1 - Usinagem do Ferro Fundido FE- 50007 com Pastilha de Metal Duro GC3015 .....	52
7.1.1 – Efeito da velocidade de corte sobre o desgaste das ferramentas .....	53
7.1.2 – Influência da microestrutura de cada camada do material sobre o desgaste das ferramentas .....	60
7.1.3 - Curvas de vida para diferentes critérios de desgaste e para as três camadas do Ferro Fundido FE-50007 .....	63
7.2 - Usinagem do Ferro Fundido FE-50007 com Pastilhas GC4015UM e GC4025UM.....	66

7.3 - Usinagem do Ferro Fundido com Pastilhas de Cermet e Cerâmicas.....	67
7.4 – Usinagem do Ferro Fundido FE-50007 – Comparação Entre os Resultados Obtidos com Ferramentas de Metal Duro e de Cerâmica.....	72
7.5 - Usinagem do Aço ABNT 1045 com Ferramentas de Metal Duro GC4015UR e GC4025UM .....	74
7.6 - Análise da Dispersão dos Resultados Obtidos para o Ferro Fundido FE- 50007 .....	77
7.7 - Medição da Força de Corte e de Avanço - Determinação da Força Específica de Corte .....	84
7.7.1- Forças obtidas para o ferro fundido .....	84
7.7.2 – Forças obtidas para o aço .....	87
7.8 - Comparação entre a Usinabilidade do Ferro Fundido FE-50007 e a do Aço ABNT 1045.....	88
 <b>CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>92</b>
8.1 – Conclusões.....	92
8.2 - Recomendações para Futuros Trabalhos .....	94
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>96</b>
 <b>APÊNDICE I .....</b>	<b>99</b>
<b>EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS .....</b>	<b>99</b>
 <b>APÊNDICE II .....</b>	<b>104</b>
<b>PLANILHAS DOS ENSAIOS .....</b>	<b>104</b>

## LISTA DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 2.1- Esquema da fundição contínua.....	4
Figura 2.2 - Microestrutura típica do ferro fundido nodular.....	8

### CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Representação esquemática da formação do cavaco [15] .....	10
Figura 3.2 - Representação esquemática do desgaste de flanco e de cratera [13].....	11
Figura 3.3 - Mecanismos de desgaste de uma ferramenta em função da temperatura ou velocidade de corte [5] .....	12
Figura 3.4a – Desenvolvimento do desgaste de flanco, para diferentes velocidades de corte [4].....	16
Figura 3.4b – Curva de vida ( $v_c - T$ ) para o desgaste de flanco [4].....	17
Figura 3.5a – Desenvolvimento do desgaste de cratera, para diferentes velocidades de corte [4].....	17
Figura 3.5b – Curva de vida ( $v_c - T$ ) para o desgaste de cratera [4]. .....	18
Figura 3.6 - Forças e velocidades no torneamento .....	19
Figura 3.7 – Representação gráfica para a determinação dos valores $k_{c1.1}$ e $(1-m_c)$ ....	20

### CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Usinabilidade da perlita e da ferrita [18].....	24
--	----

### CAPÍTULO 6

Figura 6.1 – Posicionamento dos pontos radiais de medição da dureza Brinell ao longo da seção transversal.....	39
Figura 6.2 – Seção transversal do corpo de prova e sua divisão em camadas.....	42
Figura 6.3 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 3,5 mm, reagente: nital a 2% .....	43
Figura 6.4 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 6,0 mm, reagente: nital a 2% .....	43

Figura 6.5 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 8,5 mm, reagente: nital a 2% .....	44
Figura 6.6 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 11,0 mm, reagente: nital a 2% .....	44
Figura 6.7 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 13,6 mm, reagente: nital a 2% .....	45
Figura 6.8 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 16,0 mm, reagente: nital a 2% .....	45
Figura 6.9 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 18,5 mm, reagente: nital a 2% .....	46
Figura 6.10 – Microestrutura do ferro fundido nodular Fe-50007, na profundidade de 21,0 mm, reagente: nital a 2% .....	46
Figura 6.11 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 23,0 mm, reagente: nital a 2% .....	47

## CAPÍTULO 7

Figura 7.1 – Curva de vida e equação de Taylor reduzida para o par metal duro GC3015/Ferro Fundido Nodular. ....	53
Figura 7.2 – Desgaste da ferramenta GC3015 na usinagem do corpo-de-prova na 1ª camada.....	54
Figura 7.3 – Vista da face da pastilha GC3015, 1ª camada, 280 m/min (aumento 20x). ....	55
Figura 7.4 – Vista do flanco da pastilha GC3015, 1ª camada, 280 m/min (aumento 20x) .....	55
Figura 7.5 – Desgaste da ferramenta GC3015 na usinagem da 2ª camada do corpo-de-prova. ....	56
Figura 7.6 – Vista da face da pastilha GC3015, 2ª camada, 250 m/min (aumento 20x) .....	57
Figura 7.7 – Vista do flanco da pastilha GC3015, 2ª camada, 250 m/min (aumento 30x) .....	57
Figura 7.8 – Desgaste da ferramenta GC3015 na usinagem da 3ª camada do corpo de prova.....	58

Figura 7.9 – Vista da face da pastilha GC3015, 3ª camada, 225 m/min (aumento 20x) .....	59
Figura 7.10 – Vista do flanco da pastilha GC3015, 3ª camada, 225 m/min (aumento 30x) .....	59
Figura 7.11 – Influência das camadas (microestrutura) do ferro fundido nodular FE-50007 sobre o desgaste da ferramenta GC3015 na velocidade de 225 m/min.....	61
Figura 7.12 – Curvas de desgaste de flanco x tempo de usinagem da ferramenta GC3015, na usinagem das três camadas do ferro fundido FE- 50007, na velocidade de 250 m/min.....	62
Figura 7.13 – Curvas de desgaste x tempo de usinagem da ferramenta GC3015, na usinagem das três camadas do ferro fundido FE-50007, na velocidade de 280 m/min.....	63
Figura 7.14 – Curvas de vida para as três camadas do ferro fundido nodular e para três velocidades de corte, VB de 0,2 mm .....	64
Figura 7.15 – Curvas de vida para as três camadas do ferro fundido nodular para as três velocidades de corte, VB de 0,3 mm .....	65
Figura 7.16 - Desgaste de flanco x tempo de usinagem para as pastilhas GC4015UM e GC4025UM.....	66
Figura 7.17 – Vista da face da pastilha de CERMET CT525, 280 m/min (aumento 20x) .....	68
Figura 7.18 – Vista do flanco da pastilha de CERMET CT525, 280 m/min (aumento 20x) .....	68
Figura 7.19 – Vista da face da pastilha de Cerâmica CC690, 250 m/min (aumento de 25x) .....	69
Figura 7.20 – Vista do flanco da pastilha de Cerâmica CC690, 250 m/min (aumento de 20x) .....	69
Figura 7.21 - Desgaste de flanco x tempo de usinagem para a pastilha de cerâmica SN80 usinando na 1ª camada.....	70
Figura 7.22 – Vista da face da pastilha de Cerâmica SN80, 250 m/min (aumento de 25x) .....	70
Figura 7.23 – Vista do flanco da pastilha de Cerâmica SN80 (aumento de 20x) .....	71

Figura 7.24 – Vista da face da pastilha de nitreto de silício SL 100 (aumento de 25x).....	71
Figura 7.25 – Vista do gume da pastilha de nitreto de silício SL 100 (aumento de 20x).....	72
Figura 7.26 – Desgaste de flanco x tempo de usinagem para diversas classes de pastilhas .....	73
Figura 7.27 - Usinagem do aço ABNT 1045 com as pastilhas GC4025UM e GC4015UR.....	75
Figura 7.28 – Vista da face da pastilha de Metal Duro GC4015, 250 m/min (aumento de 20x) .....	75
Figura 7.29 – Vista do flanco da pastilha de Metal Duro GC4015,250 m/min (aumento de 30x) .....	76
Figura 7.30 – Vista da face da pastilha de Metal Duro GC4025,250 m/min (aumento de 20x) .....	76
Figura 7.31 – Vista do flanco da pastilha de Metal Duro GC4025 (aumento de 30x).....	77
Figura 7.32 - Réplica do experimento na 1ª camada à velocidade de 280m/min com a ferramenta GC3015 .....	78
Figura 7.33 - Réplica do experimento na 2ª camada usando a ferramenta GC3015 e à velocidade de 280m/min.....	79
Figura 7.34 - Réplica do experimento na 1ª camada usando a ferramenta GC3015 à velocidade de 225 m/min.....	80
Figura 7.35 - Réplica do experimento na 2ª camada usando a ferramenta GC 3015 à velocidade de 250 m/min.....	80
Figura 7.36 - Réplica do experimento na 1ª camada usando a ferramenta GC 4025 UM e à velocidade de 250m/min .....	81
Figura 7.37 - Réplica do experimento na 1ª camada usando a ferramenta SN80 à velocidade de 250m/min.....	82
Figura 7.38 - Réplica do experimento na 1ª camada usando a ferramenta SN80 e à velocidade de 250m/min.....	83
Figura 7.39 - Força de corte e força de avanço para o ferro fundido FE-50007 -1ª camada .....	85

Figura 7.40 - Força de corte e força de avanço para o ferro fundido FE-50007 - 2ª camada .....	85
Figura 7.41 - Força de corte e força de avanço para o ferro fundido FE-50007 - 3ª camada .....	86
Figura 7.42 - Força de corte e força de avanço para as três camadas do ferro fundido FE-50007 .....	86
Figura 7.43 - Força de corte e força de avanço para o aço 1045.....	88
Figura 7.44 - Força de corte para o aço 1045 e para as três camadas do ferro fundido.....	91

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Aplicações dos Produtos da Fundição Contínua .....	6
---	---

### CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Microestrutura e dureza do material [2] .....	25
--	----

### CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Composição química do ferro fundido nodular ABNT FE-50007 .....	38
--	----

Tabela 6.2 - Dureza Brinell do ferro fundido nodular (esfera de $\phi=2,5$ mm), em N/mm <sup>2</sup> .....	40
---	----

Tabela 6.3 - Micro-dureza Vickers do ferro fundido nodular (penetrador piramidal de 136°, carga de 200g) .....	41
---	----

Tabela 6.4 - Microconstituintes do ferro nodular e densidade de nódulos de grafita. ....	42
---	----

Tabela 6.5 - Composição química do aço 1045 (% em peso). ....	48
---	----

### CAPÍTULO 7

Tabela 7.1 - Resumo dos ensaios; $f=0,2$ mm/rot, $a_p= 2,5$ mm .....	51
--	----

Tabela 7.2 – Tempos finais de usinagem para as três camadas e três velocidades de corte, para uma marca de desgaste VB de 0,3 mm. ....	60
---	----

Tabela 7.3 – Valores finais dos tempos de usinagem (em minutos), para as diversas camadas do corpo de prova, nas diferentes velocidades de corte. ....	64
---	----

Tabela 7.4 - Forças de corte e forças de avanço para o ferro fundido nodular: .....	84
---	----

Tabela 7.5 - Força de corte e força de avanço para o aço ABNT 1045. ....	87
--	----



## SIMBOLOGIA

$a_p$	[mm]	profundidade de usinagem
$b$	[mm]	largura de usinagem
$C_v$		vida da ferramenta para $v_c = 1$ m/min [constante]
$f$	[mm/rot]	avanço
$F$	[N]	força de usinagem
$F_c$	[N]	força de corte
$F_f$	[N]	força de avanço
$F_p$	[N]	força passiva
$h$	[mm]	espessura de usinagem (antes do corte)
$k$		coeficiente angular da curva de vida
$KT$	[mm]	desgaste de cratera
$k_{c1.1}$		força específica de corte para secção de $1 \text{ mm}^2$
$T$	[min]	vida da ferramenta
$TR$	[N]	força de tração
$v_a$	[m/min]	velocidade de avanço
$v_c$	[m/min]	velocidade de corte
$v_e$	[m/min]	velocidade efetiva
$VB$	[mm]	desgaste de flanco
$1-m_c$		coeficiente angular na fórmula de Kienzle
$\alpha$	[°]	ângulo de incidência
$\alpha'$	[°]	ângulo de incidência do gume secundário
$\beta$	[°]	ângulo de cunha
$\gamma$	[°]	ângulo de saída
$\lambda$	[°]	ângulo de inclinação
$\chi$	[°]	ângulo de direção do gume
$\chi_r'$	[°]	ângulo de direção do gume secundário

## RESUMO

Neste trabalho, compara-se a usinabilidade do ferro fundido nodular ABNT FE-50007, obtido através do processo de fundição contínua, com a usinabilidade do aço ABNT 1045.

Para os ensaios de usinabilidade foram usados três materiais de ferramentas de corte: metal duro, cerâmica e cermet, e velocidades de 225, 250 e 280 m/min. Além disso, levantou-se a curva de vida e a equação de Taylor reduzida para o ferro fundido nodular, sendo o desgaste de flanco VB o parâmetro adotado para especificar o fim de vida das ferramentas, conforme a norma ISO 3685.

O estudo de usinabilidade, sobre os corpos de prova, foi realizado por camadas, devido ao fato destes apresentarem variação microestrutural ao longo da secção transversal.

Tais ensaios geraram gráficos que, após analisados, permitiram chegar a conclusões a respeito da usinabilidade do ferro fundido nodular de fundição contínua.

Praticamente não existem publicações sobre este tema, por isso o presente trabalho tem uma importante contribuição para a fabricação de peças a partir do ferro ABNT FE-50007.

O trabalho serve de abertura para a realização de outras pesquisas sobre este tema, ou seja, a investigação da usinabilidade dos diferentes tipos de ferros fundidos nodulares de fundição contínua.

## ABSTRACT

In this work, the machinability of nodular cast iron ABNT FE-50007, obtained through continuous casting, is compared with the machinability of steel ABNT 1045.

For the machinability tests three materials for cutting tools were used, which were cemented carbide, ceramics and cermets, tried in 225, 250 and 280 m/min speeds.

In addition the life curve and the reduced Taylor equation were obtained for nodular cast iron, using the wearing down of the flank VB as the parameter adopted to specify the end of life for the tools, in accordance with ISO 3685.

The study of machinability on the sample was carried out by layers, because of the microstructural variation in the long transverse section of this sample.

There are practically no publications on this subject, therefore the present study has an important contribution to the manufacture of parts through the ABNT FE-50007 iron.

This work can be considered a step that leads to other works on this subject, i.e. the investigation of machinability of continuous casting nodular cast iron.

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

A par dos processos de obtenção de material bruto encontramos o processo de fundição contínua, de grande vantagem econômica. Este processo tecnológico, que se encontra bastante evoluído, necessita de dados complementares para o apoio de outros setores da técnica de fabricação. Por exemplo, a investigação da trabalhabilidade destes materiais, ou seja, a determinação da sua usinabilidade. O termo usinabilidade guarda um amplo significado, não podendo ser tomado como definição de uma única propriedade, a exemplo da dureza e da resistência à tração. Assim, a usinabilidade de um material somente pode ser compreendida a partir de uma análise conjunta das respostas comportamentais do material, da ferramenta e da máquina envolvidos no processo [25]. O estudo da usinabilidade de um material tem muita importância do ponto de vista econômico já que envolve diretamente a produtividade em termos de tempo de produção.

O objetivo geral deste trabalho foi pesquisar a usinabilidade do ferro fundido nodular de fundição contínua ABNT FE-50007, no seu estado bruto de fusão, isto a partir de experimentos de torneamento. Para tanto, foram investigados os desgastes das ferramentas de corte, ou mais precisamente, a vida das ferramentas de corte e as forças de corte necessárias para a usinagem deste material. Além disso, foi realizado um levantamento da curva de vida das ferramentas aplicadas no torneamento deste material e, conseqüentemente, chegou-se à equação de Taylor reduzida das mesmas.

Paralelamente ao estudo da usinabilidade do ferro fundido acima citado foi realizado um estudo da usinabilidade do aço ABNT 1045 com o intuito de comparar os dois materiais e, com isso, analisar a possível viabilidade de substituição de um material pelo outro, visto que suas propriedades mecânicas são semelhantes.

A redação deste trabalho está estruturada da seguinte maneira: o capítulo 1 apresenta uma breve explanação geral e os objetivos do trabalho; os capítulos 2,3,4 e 5 tratam da revisão bibliográfica, respectivamente, da fundição contínua e seus produtos, usinabilidade dos materiais, usinabilidade dos ferros fundidos e materiais de ferramentas para a usinagem de ferro fundido; o capítulo 6 refere-se à metodologia,

caracterização dos materiais e equipamentos; o capítulo 7 aborda os resultados obtidos e respectiva análise; o capítulo 8 traz as conclusões e sugestões para trabalhos posteriores e o capítulo 9 diz respeito à referência bibliográfica.

A referida pesquisa foi realizada no âmbito de um convênio entre o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina e a Indústria de Fundição Tupy Ltda – Joinville – Santa Catarina.

## **CAPÍTULO 2**

### **A FUNDIÇÃO CONTÍNUA E SEUS PRODUTOS**

#### **2.1- Fundição Contínua**

No passado, costumava-se produzir perfis diversos e barras redondas de ferro fundido, ambos fundidos em moldes de areia. O uso de moldes metálicos para fundir barras ficou restrito a ligas não-ferrosas de baixo ponto de fusão. A adoção de moldes metálicos para fazer fundições de ferro fundido enfrentava dois grandes problemas: primeiro, os moldes eram expostos a tensões térmicas muito grandes e, conseqüentemente, ocorria um desgaste considerável quando utilizados na fundição de ferros fundidos; segundo, o aumento da taxa de resfriamento tende a causar a formação de cementita durante a solidificação, tendo como conseqüência a diminuição da usinabilidade do ferro fundido [14].

Pelas razões apontadas, alta tensão térmica e um rápido resfriamento, é compreensível que a produção de ferro fundido, utilizando o processo de fundição em matriz, teve dificuldades de ultrapassar a fase inicial de desenvolvimento.

Atualmente, utiliza-se o processo de fundição contínua, no qual é empregado um molde de grafita refrigerado a água. Uma das características deste processo é que o produto resultante da fundição é mais longo do que o molde, permitindo a obtenção de perfis na forma de barras de vários metros de comprimento. Isso ocorre devido ao fato de que o metal fundido é conduzido, de forma contínua, para dentro de um molde com refrigeração externa e emerge deste com a extremidade já solidificada.

O molde, devido aos danos decorrentes de tensões térmicas provenientes do processo de fundição, necessita de constantes reparos ou até mesmo ser substituído. Porém, por possuir dimensões menores, destacando-se o comprimento, reduz-se o custo de manutenção e reposição, tornando-o viável economicamente [14].

No início, a taxa de resfriamento do produto, no molde, é muito rápida. Esta é seguida por um resfriamento muito lento do fundido, na medida em que este emerge do molde e entra em contato com o ar. Deixando o molde, a casca formada é novamente aquecida, fato que ocorre devido ao núcleo ainda encontrar-se na fase líquida.

Referindo-se ao sistema ferro-carbono, isto significa que a temperatura eutética de  $1145^{\circ}\text{C}$  é ultrapassada rapidamente, seguida por uma permanência prolongada na temperatura entre  $950^{\circ}\text{C}$  e  $721^{\circ}\text{C}$  (temperatura de formação de perlita). A Figura 2.1 apresenta um esquema do processo de fundição contínua.

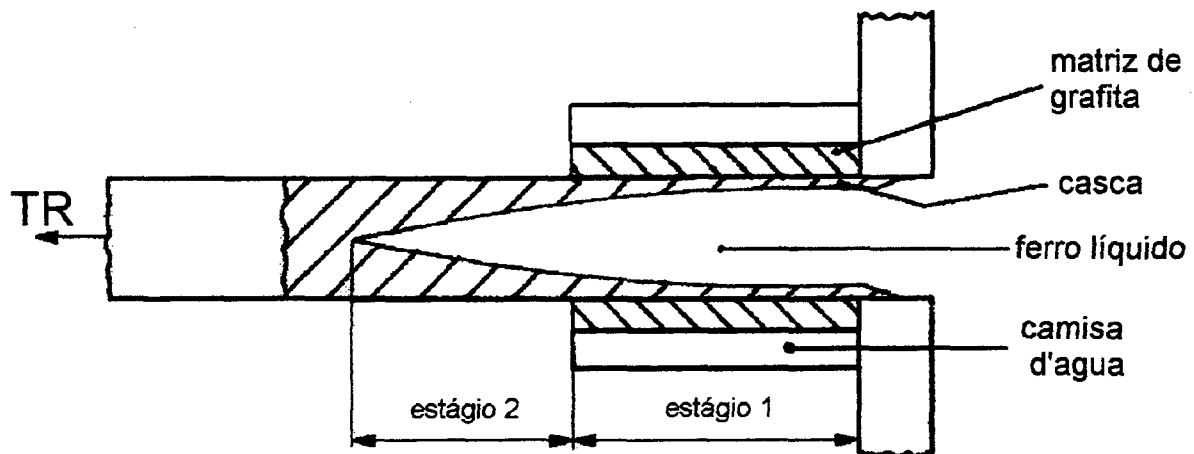


Figura 2.1- Esquema da fundição contínua

O processo de fundição contínua permite que se obtenham as mais variadas formas de perfis, tais como seções redondas, quadradas, retangulares, ovais e outras que mais se aproximem da geometria final da peça a ser confeccionada a partir da barra.

### 2.1.1 - Vantagens da fundição contínua

a) **Redução de porosidade** - a porosidade é um defeito de fundição que ocorre internamente à peça e geralmente apresenta-se na forma arredondada, com superfície interna lisa, podendo apresentar aspecto alongado e em diversos tamanhos. A formação de porosidade na fundição convencional pode ter diversas causas, todas elas provenientes de fontes de gases. Podem ser citadas como prováveis fontes de gases formadores de porosidade:

l) Aprisionamento mecânico de gases:

- Contido nas cavidades do molde;
- Gerados pelos moldes e machos;
- Devido à turbulência durante o vazamento e;
- Sistemas de canais inadequados.

## II) Gases dissolvidos no metal líquido:

Na fundição contínua é utilizado um molde de grafita, o qual não libera gases quando submetido à altas temperaturas. Além disso, não existem as principais fontes de gases anteriormente citadas. Em perfis produzidos por fundição contínua, a presença de gases limita-se apenas ao contido no metal líquido, o que reduz acentuadamente a tendência à formação de porosidade em relação a outros processos de fundição [17].

b) **Ausência de rechupes** - os rechupes são cavidades ocasionadas pela contração do metal líquido durante a solidificação. O controle deste defeito é tão mais difícil quanto mais complexa for a geometria da peça fundida, sendo que os rechupes situam-se sempre nas regiões mais espessas, nos centros térmicos das peças. Devido a alimentação da matéria-prima ser contínua o produto final é isento de rechupes.

Na fundição de ferro fundido existe um agravante que é a expansão do molde, aumentando a necessidade de metal líquido para compensar a variação dimensional que a peça sofre.

c) **Estrutura mais refinada** - também devido ao uso de moldes de grafita refrigerados a água, os ferros fundidos de fundição contínua possuem estrutura mais refinada em relação às peças de mesma espessura (módulo de resfriamento) produzidas em moldes de areia, conferindo ao material melhores propriedades mecânicas e a geometria desejada às barras [17].

d) **Menos sobre-metal para ser removido por processos de usinagem** - além do fato de que as barras são produzidas em formato próximo à dimensão final da peça, a inexistência de ângulos de saída, pequena quantidade de inclusões, defeitos



superficiais e o bom acabamento superficial bruto de fusão melhoram a usinabilidade e também contribuem para a redução do sobre-metal a ser removido por processos de usinagem.

Tabela 2.1 - Aplicações dos Produtos da Fundição Contínua

<b>Aplicações</b>	<b>Descrição de exemplos</b>
<b>Motores</b>	A maioria dos produtos obtidos a partir do ferro fundido contínuo consistem em barras redondas, de modo que muitas das aplicações são circulares na forma, onde os produtos são idealmente indicados para fabricação em tornos mecânicos. No caso de motores, vários tipos de buchas e êmbolos são produzidos para sistemas hidráulicos e de potência. Muitos dos componentes usados em serviço hidráulico recebem um fino acabamento superficial por retificação, para o qual barras fundidas continuamente são idealmente indicadas. Guias de válvulas e partes de amortecedores são algumas das aplicações típicas deste tipo de material [5].
<b>Hidráulica</b>	Blocos de controle tipo “manifolds” em aplicações de alta pressão, cilindros hidráulicos, pistões, selos e tampas de cilindros.
<b>Bombas e Compressores</b>	Rotores para grandes compressores de rosca; rotores de pás deslizantes para compressores e bombas; caixas de mancais em motores pneumáticos e tampas de bombas.
<b>Equipamentos de Precisão</b>	Excelentes rigidez e estabilidade dimensional em serviço permitem que barras de fundição contínua sejam empregadas na fabricação de equipamentos de medição de precisão.
<b>Bainha de Termopar</b>	Principalmente aquelas usadas em fornos para fundição de alumínio.
<b>Transmissão de Potência</b>	Pequenas engrenagens, componentes para freios e buchas cônicas de travamento para polias de transmissão por correia.
<b>Rolos para Impressão</b>	A granulação fina do material e o acabamento superior torna o produto indicado para rolos de impressão.
<b>Indústria de Combustível Nuclear</b>	Produção dos moldes para o bastão de combustível.
<b>Indústria do Vidro</b>	Matrizes, moldes, pistões e anéis de pescoço usados na fabricação de garrafas e equipamentos de laboratório.

## **2.2 - Ferro Fundido Nodular**

O ferro fundido de fundição contínua pode ser padronizado nas classes ferro fundido cinzento, ferro fundido nodular e ferro fundido bainítico. O presente trabalho foi realizado com o ferro fundido nodular FE-50007. As principais características gerais desse tipo de material são descritas a seguir.

### **2.2.1- Definição**

A composição do ferro fundido nodular é muito semelhante à composição do ferro fundido cinzento, porém, durante a sua fusão a grafita é levada a nuclear como partículas esféricas. Isto é obtido através da adição, ao ferro líquido, de uma quantidade muito pequena de magnésio, cuja etapa do processo é denominada de nodulização. É usualmente inoculado, que é o processo de introdução, no ferro fundido, de agentes de nucleação. Tais agentes servem de embriões dentro do material líquido, favorecendo o crescimento dos cristais [2]. O ferro fundido nodular é produzido com os mesmos tipos de matérias-prima utilizadas na fundição do ferro fundido cinzento, porém, usualmente, requer uma pureza maior. Suas propriedades de fundição, tais como fluidez, são comparáveis com as do ferro fundido cinzento. A vantagem principal deste em relação ao ferro fundido cinzento é sua combinação de alta resistência mecânica e ductilidade. Outras vantagens correspondem a um alto módulo de elasticidade, uma relação tensão/deformação linear para quase toda a região situada abaixo do ponto de escoamento e grandes intervalos de resistência à tração e escoamento. Propriedades como usinabilidade e resistência à corrosão são comparáveis com as do ferro fundido cinzento, exceto que o ferro fundido nodular tem melhor resistência à oxidação em elevadas temperaturas. Ambos podem ser tratados termicamente, ou ligados, para melhorar certas propriedades, especialmente a resistência ao desgaste [2].

### 2.2.2 - Microestrutura

O ferro fundido nodular tem uma microestrutura de nódulos de grafita encaixados em envelopes de ferrita livre (estrutura de “olho de boi”), tudo inserido numa matriz de perlita, figura 2.2 [2].

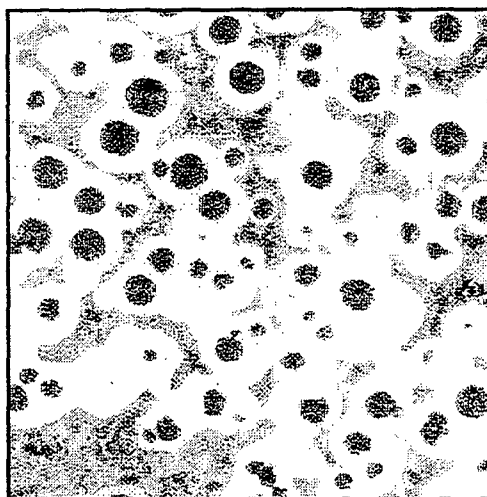


Figura 2.2 - Microestrutura típica do ferro fundido nodular

Em algumas estruturas, no estado bruto de fundição, encontra-se cementita livre juntamente com ferrita, perlita e esteadita. As quantidades relativas de perlita, ferrita e cementita dependem da composição do ferro fundido, do tipo de nodulizante e inoculante, do método de fundição e da taxa de resfriamento [2].

### 2.2.3 - Forma da grafita

Algumas vezes, um tipo esferoidal consistente de grafita não é obtido na produção regular do ferro fundido nodular. Isto pode acontecer devido à presença insuficiente de nodulizante, tratamento térmico não-uniforme e a presença de elementos inibidores, tais como estanho e titânio. Quanto mais as partículas de grafita se aproximarem da forma esferoidal e mais uniformemente estes esferóides estiverem distribuídos, maiores serão as chances das propriedades de tração e de impacto alcançarem exigências específicas [2].

## **CAPÍTULO 3**

### **USINABILIDADE – DESGASTE DE FERRAMENTA E FORÇAS DE CORTE**

#### **3.1 - Definições**

O termo usinabilidade compreende todas as propriedades de um material que tem influência sobre o processo de usinagem. Com o termo usinabilidade são descritas todas as dificuldades que um material apresenta em sua usinagem [15].

Na usinagem verifica-se que os diversos materiais se comportam de maneira distinta, sendo que alguns podem ser trabalhados com grande facilidade enquanto que outros oferecem uma série de problemas ao operador da máquina. Entre os problemas que freqüentemente ocorrem pode-se citar: desgaste rápido ou superaquecimento da ferramenta, “empastamento” ou “enganchamento” da ferramenta pelo material da peça, lascamento do gume, acabamento superficial inadequado da peça usinada, necessidade de grandes forças ou potência de corte [25].

O comportamento de um material, quanto à usinabilidade, depende de muitos fatores metalúrgicos e da operação de usinagem que está sendo executada, incluindo a máquina-ferramenta, a ferramenta de corte, o fluido de corte e as condições de usinagem, tais como velocidade, avanço e profundidade de corte. Considerando que o comportamento à usinabilidade é diferente para as diversas operações de usinagem, a usinabilidade deveria ser vista como uma interação antes do que uma propriedade específica do material [25].

Apesar de ser costumeiro considerar a usinabilidade como uma propriedade específica do material, surgiu a necessidade de defini-la quantitativamente para poder testar, comparar e, principalmente, usar esta informação em decisões referentes à produção industrial.

Para a caracterização da usinabilidade de um material é empregada a vida da ferramenta como sendo o termo de maior importância, a qual, na prática, é determinada através de ensaios de longa duração, utilizando velocidades de corte usuais em máquinas-ferramenta, mas que, no entanto, exigem um elevado tempo de ensaio e grande quantidade de remoção de material.

### 3.1.1 - Desgaste e vida da ferramenta

No início do corte, a cunha da ferramenta penetra no material da peça, deformando-a elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte, figura 3.1 [15].

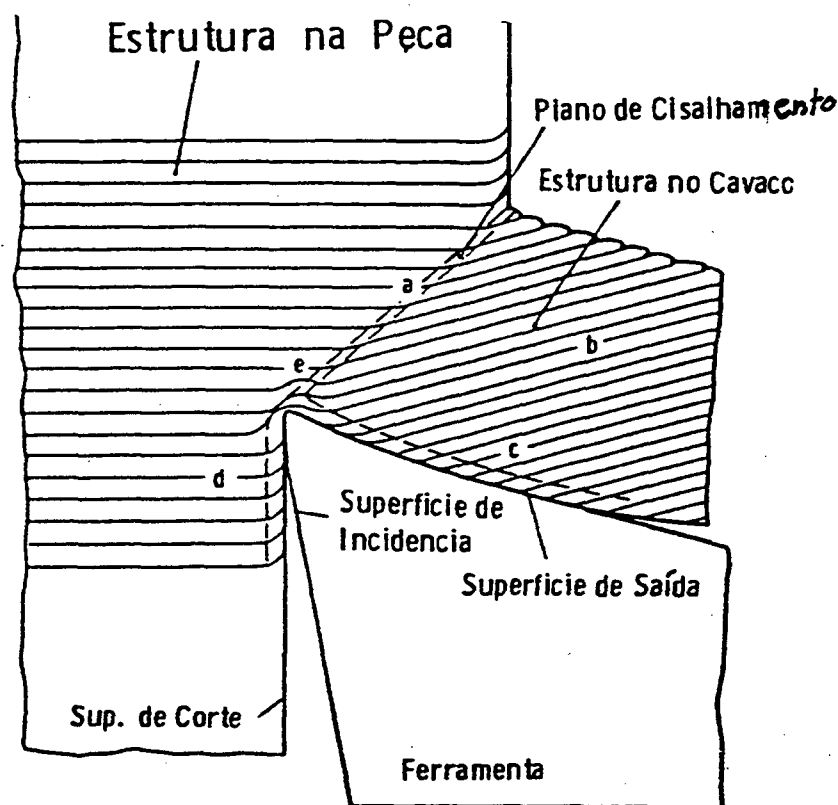


Figura 3.1 - Representação esquemática da formação do cavaco [15]

Durante a usinagem a cunha de corte é submetida a um desgaste que depende da forma de solicitação e do tempo de utilização da ferramenta. O desgaste ocorre na face e nos flancos. O desgaste por oxidação no flanco secundário tem uma importância apenas secundária. Na prática, em decorrência disto, os desgastes medidos e controlados são os desgastes tanto de flanco quanto de cratera, os quais geralmente são empregados como critério de fim de vida, conforme ilustra a figura 3.2 [13].

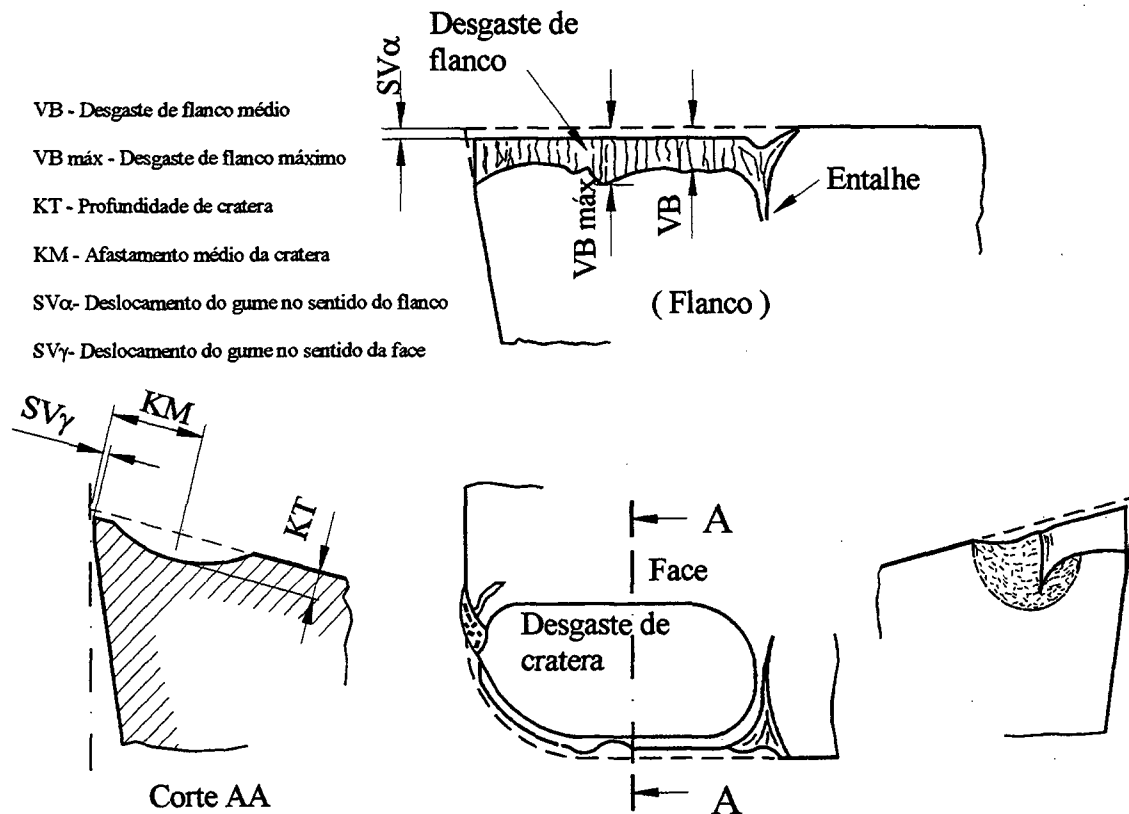


Figura 3.2 - Representação esquemática do desgaste de flanco e de cratera [13]

### 3.1.2 - Causas de desgaste

As condições de atrito na região de contato entre a ferramenta e a peça podem ser comparadas com as condições de atrito a seco e no vácuo [15]. O desgaste da ferramenta, numa regra geral, é relativamente rápido, como decorrência das solicitações térmicas e mecânicas elevadas. De acordo com o conhecimento atual, distinguem-se várias formas influentes sobre o desgaste da ferramenta, figura 3.3 [5], as quais são:

- Danificação do gume em decorrência de solicitações térmicas e mecânicas excessivas; microtrincas e lascamentos;
- Adesão (cisalhamento de microcaldeamento ou microsoldagem);
- Difusão;
- Abrasão mecânica e ;
- Oxidação.

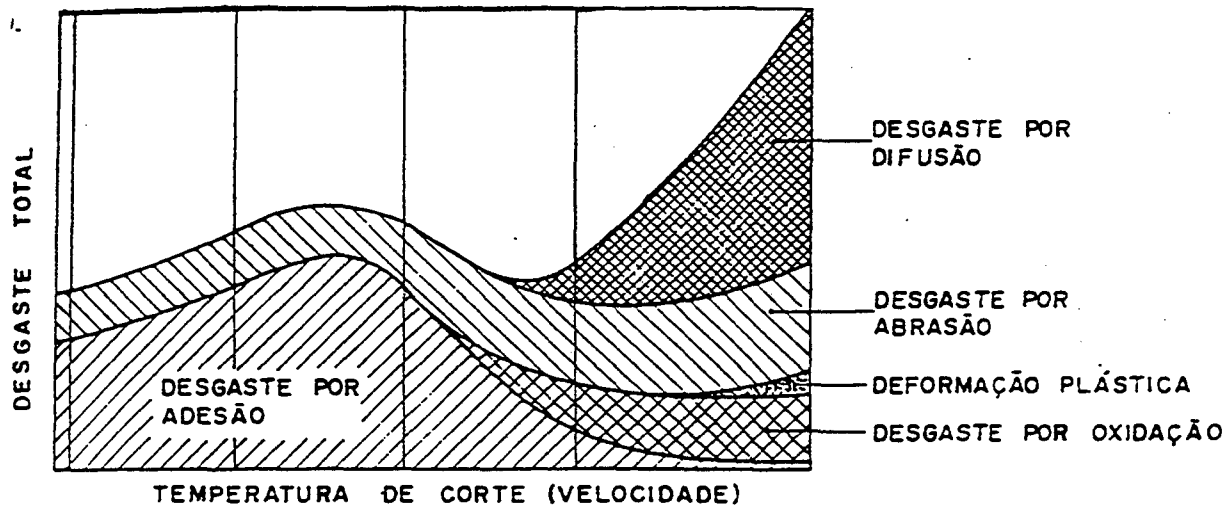


Figura 3.3 - Mecanismos de desgaste de uma ferramenta em função da temperatura ou velocidade de corte [5]

Os diversos mecanismos de desgaste, em geral, atuam simultaneamente de forma que, tanto sua causa quanto seus efeitos, dificilmente podem ser distinguidos entre si [15]. Danificações do gume como microlascamentos, trincas transversais e longitudinais, bem como deformação plástica, são decorrentes de solicitações térmicas e mecânicas excessivas. A deformação plástica ocorre quando a dureza a quente do material da ferramenta não é mais suficiente para resistir às pressões de usinagem, o que é verificado especialmente em maiores velocidades de corte e avanço.

A abrasão é o arrancamento de finas partículas de material da ferramenta em decorrência do atrito, altas pressões e temperaturas entre a peça e a ferramenta. Esta forma de desgaste aumenta com o número de inclusões e partículas duras no material da peça, tais como carbonetos e óxidos. Um aumento da velocidade de corte resulta num aumento considerável da taxa de desgaste em virtude do efeito da redução da resistência à abrasão da ferramenta em temperaturas de trabalho mais altas [25].

A aderência de material, proveniente da peça usinada, sobre as asperezas superficiais da ferramenta se deve à ação das altas temperaturas e pressões existentes na zona de corte e ao fato de que a superfície inferior do cavaco, recém arrancado, apresenta-se limpa e sem camadas protetoras de óxidos e, portanto, muito ativa. A

prova de tal aderência é a formação do gume postiço, formado por partículas que se soldam na face da ferramenta e apresentam um alto grau de deformação a frio, isto é, estão encruadas, duras e resistentes.

A difusão ocorre em temperaturas mais elevadas, nas quais as moléculas adquirem maior mobilidade. Para as ferramentas de aço-rápido esta forma de desgaste não tem significado, pois a faixa de temperatura de difusão é bem mais alta do que a temperatura de amolecimento da ferramenta. Entretanto, no caso do metal duro ela é relevante, especialmente quando se trabalha com elevadas velocidades de corte.

A oxidação, como ocorre através do aquecimento da peça sob altas temperaturas formando uma camada extremamente dura comumente denominada de carepa, pode ser causa de desgaste. A oxidação em baixas temperaturas é evitada por camadas protetoras de material oxidado.

Correntes elétricas são produzidas na região de contato entre a ferramenta e a peça durante a usinagem. Estas correntes podem ser explicadas como sendo um fenômeno termoelétrico gerado pelo aquecimento do ponto de união de um par de materiais distintos (termopar). O circuito, formado pela máquina-ferramenta, peça e ferramenta de grandes seções e boa condutibilidade elétrica, tem uma resistência baixíssima, da ordem de poucos miliohms. Desta forma, apesar de ser pequena a tensão gerada, a corrente que circula pode atingir valores da ordem de 5 A ou mais. A circulação de tais correntes contribui para o desgaste de flanco da ferramenta [25].

### **3.1.3 - Critérios para a determinação do fim de vida da ferramenta**

À medida em que a ferramenta vai se desgastando observam-se variações mais significativas no processo de usinagem. A temperatura se eleva progressivamente, a força de corte e a potência consumida aumentam, as dimensões da superfície usinada se alteram, o acabamento superficial piora. Em condições extremas ocorre um faiscamento intenso e a superfície usinada torna-se áspera. Com as ferramentas de aço-rápido ocorre um superaquecimento do gume, o qual amolece e fica com aspecto de queimado, ao mesmo tempo ocorre um violento efeito de frenagem da ferramenta sobre a peça, produzindo uma faixa altamente polida pelo atrito [25].



Em ferramentas de metal duro, o aumento das forças de corte, no caso de um desgaste excessivo, provoca o lascamento e destruição total do gume. A utilização de uma ferramenta até este ponto é totalmente desaconselhável, pois será necessário um longo trabalho de reafiação com a remoção de uma camada considerável de material da ferramenta antes que se possa estabelecer um novo gume adequado. A fixação do ponto representativo do fim de vida de uma ferramenta é fundamental no estudo da usinabilidade. Na prática e nos ensaios de laboratório são utilizados diversos critérios para se estabelecer este ponto representativo e a escolha depende, em grande parte, das exigências de usinagem, precisão de medidas de acabamento e do material da ferramenta [25]. Como critérios pode-se citar:

- a) Falha completa da ferramenta que a inabilita para o corte, podendo ter como causa o superaquecimento (queima), o lascamento ou, até mesmo, a quebra. Na prática não convém ir até este ponto, pois o custo de reafiação, consumo de energia e os danos causados na superfície da peça usinada elevam o custo do processo, tornando-o economicamente inviável;
- b) Falha preliminar da ferramenta acusada pelo aquecimento na superfície usinada ou na superfície transitória da peça, seguido de uma estreita faixa altamente polida, indicando forte atrito entre o flanco da ferramenta e a peça usinada. Este é um critério freqüentemente utilizado no emprego de ferramentas de aços-rápidos;
- c) Largura da marca de desgaste do flanco, que é o critério mais utilizado para a determinação do fim de vida da ferramenta de metal duro e de cerâmica. Uma vez alcançada uma marca de desgaste de 0,3 a 0,8 mm, as ferramentas de metal duro perdem a eficiência de corte. As maiores marcas de desgaste são admissíveis em ferramentas de maiores dimensões, velocidades de corte mais baixas e com pastilhas mais tenazes. Pastilhas mais duras e mais frágeis, tais como as de cerâmica, não admitem largura da marca de desgaste maior que 0,5 mm, sob pena de ocorrer severo lascamento do gume [25];
- d) Vibrações intensas da peça, ou da máquina, geram ruídos fortes e também podem impedir o prosseguimento da usinagem. Podem ter como causa o desgaste do flanco da ferramenta;
- e) Profundidade “KT” da cratera, figura 3.2, ou faixa remanescente entre o gume e o início da cratera, em ferramentas de metal duro podem determinar o fim de vida, pois

a profundidade “KT” da cratera ameaça o lascamento da pastilha ou, ainda, porque a faixa K se reduz a ponto de ameaçar a integridade do gume;

- f) Deficiência de acabamento superficial que ocorre freqüentemente com a mudança súbita e pronunciada do grau de acabamento superficial, a qual pode ser tomada como limite de vida da ferramenta;
- g) O aparecimento consistente de rebarbas na peça decorrente da usinagem pode indicar a proximidade do fim de vida da ferramenta;
- h) Formação do cavaco, que pode sofrer variação brusca, também pode ser usada como critério de fim de vida;
- i) Alteração das dimensões da peça usinada provocada pelo desgaste do gume da ferramenta. Pode ser usado como limite de vida um determinado deslocamento do gume, por exemplo, de 0,1 mm correspondendo a um aumento de 0,2 mm no diâmetro da peça;
- j) Aumento da força de corte, torque ou potência até um determinado limite pré-fixado em ensaios de laboratório pode determinar o limite de vida da ferramenta;
- k) Aumento da força de avanço é utilizada para fixar o limite de vida, especialmente em brocas. Este está intimamente relacionado com o desgaste do flanco (superfície de incidência) e, portanto, com a largura da marca de desgaste;
- l) O aumento da temperatura no gume tem sido usado, em laboratório, para definir a vida da ferramenta.

### **3.1.3.1 – Análise da usinabilidade através dos desgastes da ferramenta**

Em pesquisas, principalmente de laboratório, é freqüente a utilização dos desgastes de flanco e de cratera para caracterizar a usinabilidade dos materiais. A metodologia utilizada para realizar esse tipo de pesquisa encontra-se detalhada no trabalho desenvolvido por Consalter [8] e na norma ISO 3685 [13].

Com o propósito de facilitar, por parte do leitor, a análise dos resultados deste trabalho, destacam-se dois pontos principais da metodologia anteriormente referida, os quais são:

- a) A representação gráfica do desgaste das ferramentas;
- b) A determinação da curva de vida das ferramentas.

Para efetuar a apresentação dos resultados obtidos nos experimentos (ensaios) de usinagem, cujo o objetivo foi estudar o desgaste e a vida das ferramentas ao longo do processo de usinagem, utilizou-se representações gráficas em escala bilogarítmica, figuras. 3.4a e 3.5a, e escala linear, figuras. 3.4b e 3.5b, de acordo com a norma ISO 3685 [13]. É usual indicar na ordenada o tipo de desgaste observado na ferramenta (flanco ou cratera) e o valor do mesmo em mm e na abcissa o tempo de usinagem ( $t$ ) em minutos.

Nas figuras. 3.4b e 3.5b, cada curva é obtida com uma determinada velocidade de corte e na medida em que ocorre um aumento desta velocidade observa-se uma intensificação do desgaste da ferramenta, uma vez mantidas inalteradas as demais variáveis.

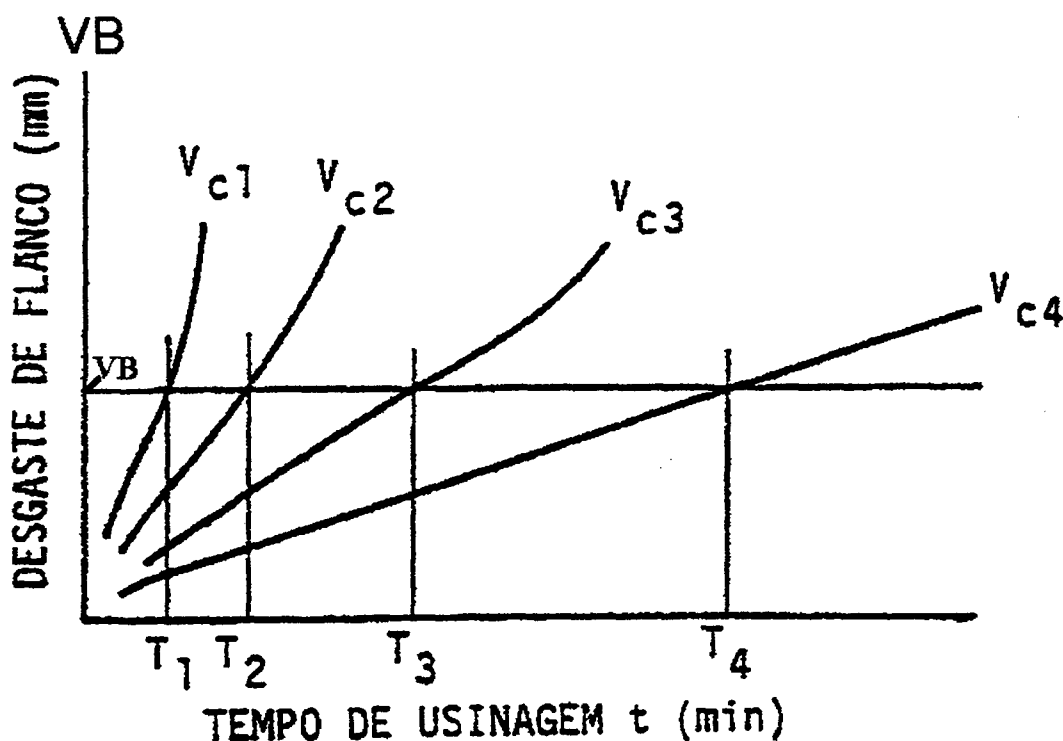


Figura 3.4a – Desenvolvimento do desgaste de flanco, para diferentes velocidades de corte [4]

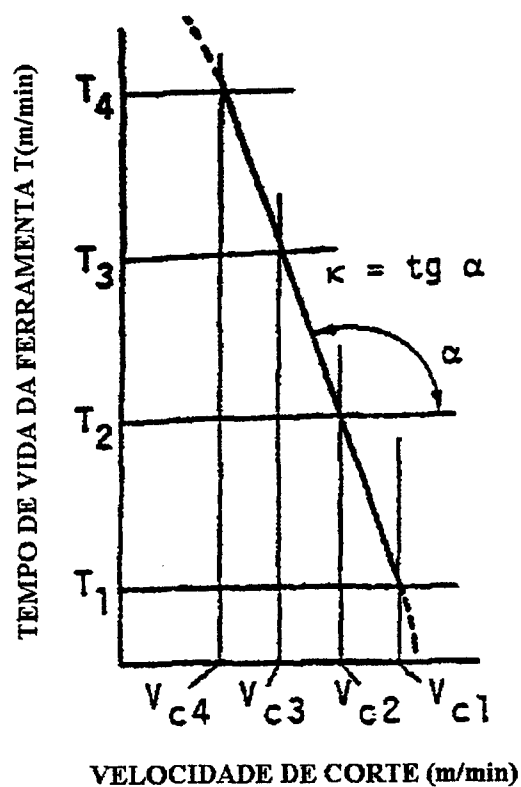


Figura 3.4b – Curva de vida ( $v_c - T$ ) para o desgaste de flanco [4]

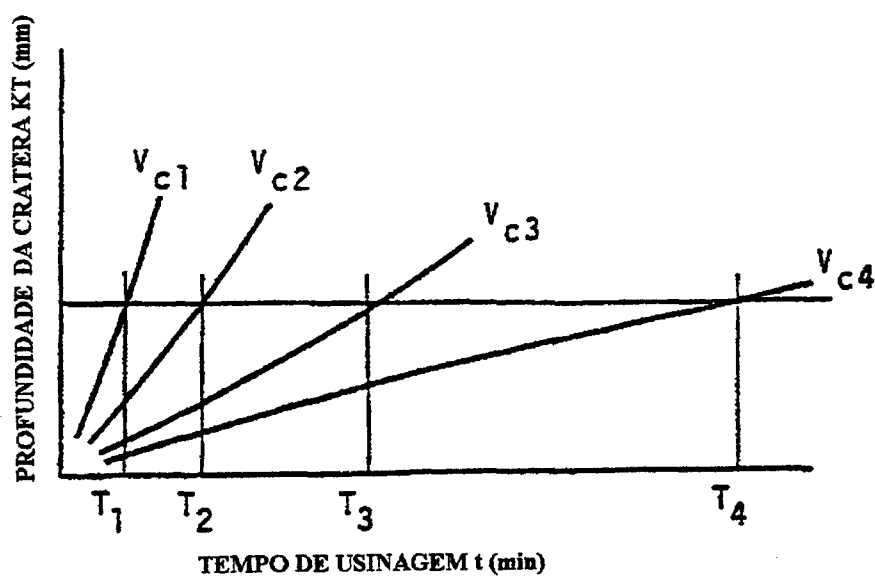


Figura 3.5a – Desenvolvimento do desgaste de cratera, para diferentes velocidades de corte [4]

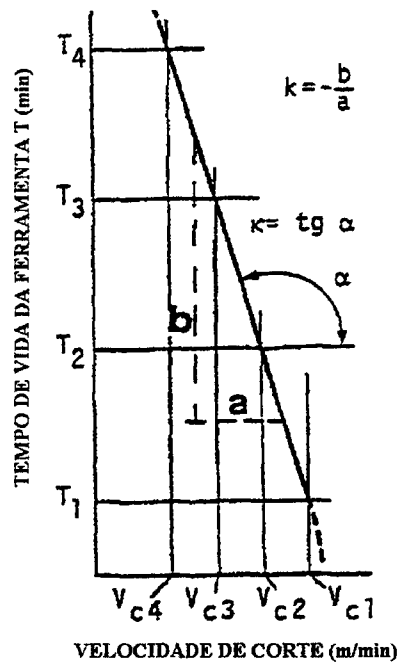


Figura 3.5b – Curva de vida ( $v_c - T$ ) para o desgaste de cratera [4].

De posse desses resultados e fixando um critério de fim de vida, ou seja, definindo um valor limite para um ou mais tipos de desgaste que ocorrem na ferramenta, figuras 3.4b e 3.5b, determina-se a curva de vida da ferramenta, figuras 3.4a e 3.5<sup>a</sup>, a qual é normalmente apresentada em diagrama bilogarítmico, tendo na ordenada a vida da ferramenta expressa em minutos e na abcissa a velocidade de corte em (m/min).

Esta curva pode ser representada pela expressão " $T = v_c^k \cdot C_v$ " (equação 1), conhecida na literatura clássica de usinagem como equação de Taylor. Na referida equação,  $v_c$  é a velocidade de corte (m/min), " $T$ " é a vida da ferramenta (min), " $k$ " é o fator que indica a inclinação da curva de vida e " $C_v$ " representa a vida  $T$  para uma velocidade de corte  $v_c = 1$  m/min.

### 3.1.3.2 – Análise da usinabilidade através das forças de corte

Conforme já referido anteriormente, a força necessária para usinar um determinado material representa uma importante informação para caracterizar as propriedades desse material, como por exemplo a sua usinabilidade. Além disto, o conhecimento da magnitude e direção das forças de usinagem são informações

valiosas para os projetistas de ferramentas, máquinas-ferramentas e dispositivos de fixação de peças. No torneamento, a força de usinagem pode ser decomposta em três componentes distintos: força principal de corte ( $F_c$ ), força de avanço ( $F_f$ ) e força passiva ou de recuo ( $F_p$ ), conforme ilustra a figura 3.6. As velocidades indicadas nessa figura são as de avanço ( $v_a$ ), de corte ( $v_c$ ) e efetiva ( $v_e$ ).

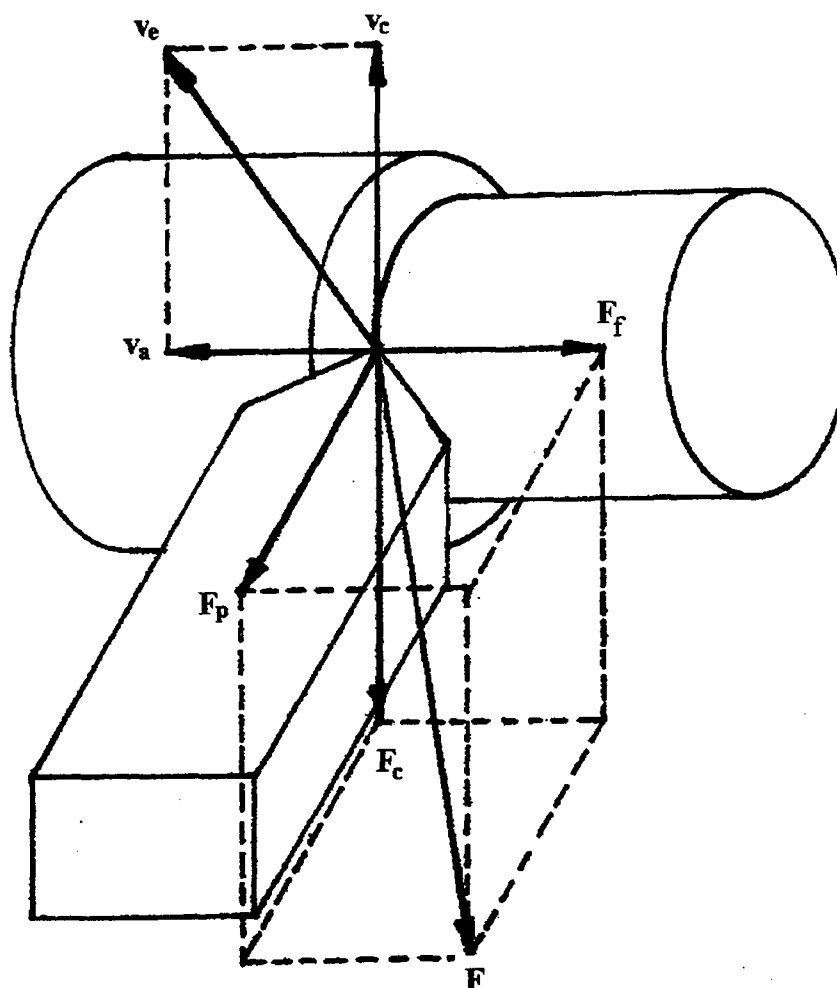


Figura 3.6 - Forças e velocidades no torneamento

Uma vez conhecida a magnitude das forças pode-se determinar as forças específicas de corte, as quais representam as pressões ou as forças atuantes sobre a ferramenta exercidas por um cavaco de seção de  $1 \text{ mm}^2$ . Segundo Ferraresi [12], existem vários métodos que podem ser utilizados para tal finalidade, cada qual com aspectos positivos e negativos. No entanto, na atualidade, o método mundialmente mais utilizado pelos pesquisadores é o de Kienzle, um excepcional pesquisador alemão

[15]. A partir de suas pesquisas, Kienzle obteve a seguinte relação empírica para a força específica de corte:

$$F_c/b = k_{c1.1} \cdot h^{(1-m_c)} \quad (\text{equação 2})$$

Ainda, segundo Kienzle, a representação gráfica bilogarítmica desta relação pode ser realizada da forma como mostra a figura 3.7:

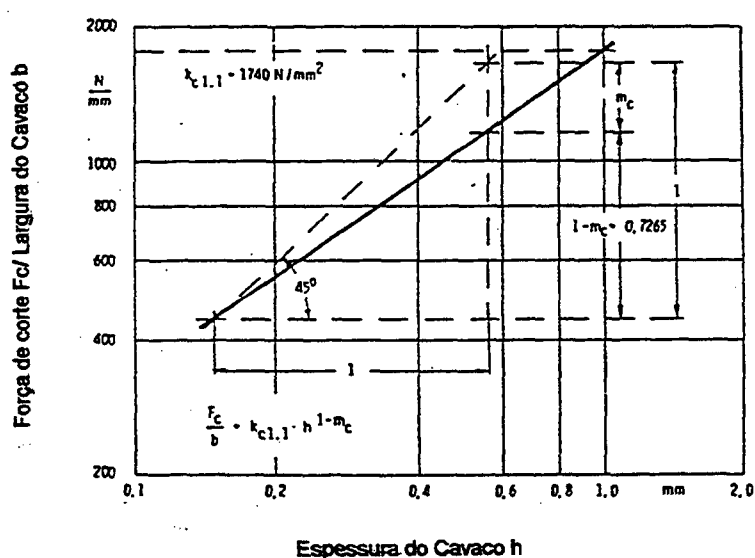


Figura 3.7 – Representação gráfica para a determinação dos valores  $k_{c1.1}$  e  $(1-m_c)$

Nessa referida equação “h” representa a espessura do cavaco, “b” a largura de usinagem,  $k_{c1.1}$  refere-se a força específica de corte para a secção de  $1 \text{ mm}^2$  e “ $(1-m_c)$ ” indica a inclinação da reta  $F_c/b=f(h)$  no sistema bilogarítmico [15].

No método de Kienzle é freqüente utilizar-se uma gama de valores de avanços, em torno de seis, mantendo-se inalterados a velocidade e a profundidade de corte. Para cada condição de usinagem recomenda-se tomar no mínimo três leituras de força, utilizando-se o valor médio correspondente às medições efetuadas. As medições de força para determinação de  $k_{c1.1}$  devem ser efetivadas apenas enquanto o desgaste da ferramenta não ultrapassar os valores de  $VB=0,1 \text{ mm}$  e/ou  $KT=0,01 \text{ mm}$ .

Têm-se constatado, experimentalmente, que a força específica de corte depende dos seguintes fatores principais [12], os quais são relatados a seguir:

- Material da peça;
- Secção de corte;
- Geometria da ferramenta;
- Ângulo de direção do gume;
- Afiação da ferramenta;
- Velocidade de corte;
- Rigidez da ferramenta.

a) **Material da peça** - a composição química do material exerce notável influência sobre o valor de  $kc_{1,1}$ . Assim, para os aços carbono e os aços de corte fácil, o aumento da percentagem de carbono acarreta em um aumento da força específica de corte. Vale salientar que o aumento do percentual de fósforo diminui o valor de  $kc_{1,1}$ . [12].

b) **Secção de corte** - verificou-se, experimentalmente, que a força específica de corte diminui com a área da secção de corte. Esta diminuição de  $kc_{1,1}$  é devida, principalmente, ao aumento do avanço ( $f$ ). O aumento da profundidade de corte praticamente não altera o valor de  $kc_{1,1}$ , a não ser para pequenos valores de  $a_p$  (profundidade de corte). Geralmente, na prática, utiliza-se relações  $a_p/f$  superiores a cinco, de maneira que a influência do gume secundário sobre o gume principal seja pequena.

c) **Geometria da ferramenta** - quanto maior o valor do ângulo de saída efetivo menor será o valor de  $kc_{1,1}$ . Deve-se notar, porém, que o aumento de tal ângulo diminui a resistência da ferramenta e aumenta sua sensibilidade a choques. O ângulo de incidência, quando muito pequeno, tende a aumentar o valor de  $kc_{1,1}$ , pois há um aumento do atrito entre a peça e o flanco da ferramenta. A influência do ângulo de inclinação  $\lambda$  é verificada apenas para valores negativos elevados. Neste caso, a força passiva  $F_p$  aumenta consideravelmente, podendo fletir a peça usinada. A força principal de corte diminui com o aumento do ângulo de direção do gume principal  $\chi_r$ ,



desde que não haja interferência do gume secundário de corte com a superfície trabalhada da peça, isto é, para  $\chi_r' > 5^\circ$ . Geralmente  $\chi_r'$  é determinado entre  $45^\circ$  e  $75^\circ$ .

- d) **Afiação da ferramenta** - o estado de afiação da ferramenta exerce notável influência sobre o valor de  $kc_{1,1}$ . Dentro da faixa de desgaste admissível da ferramenta, a força de corte pode chegar a valores 25% maiores [25].
- e) **Velocidade de corte** - verifica-se que na faixa de velocidade de trabalho de vários metais utilizando ferramenta de metal duro a pressão específica de corte diminui com o aumento da velocidade de corte [12].

## CAPÍTULO 4

### USINABILIDADE DOS FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos cinzentos e nodulares apresentam, de modo geral, boa usinabilidade devido à presença de grafita na microestrutura, a qual proporciona, além de uma auto-lubrificação, a necessária quebra dos cavacos. Em geral, os critérios para avaliação da usinabilidade destes materiais estão relacionados aos seguintes fatores:

- a) Vida útil da ferramenta de corte;
- b) Força de corte e potência necessária à usinagem e;
- c) Acabamento superficial da peça usinada.

Apesar do importante papel desempenhado pela morfologia da grafita em relação à usinabilidade, a vida útil das ferramentas depende muito da matriz metálica. Assim, matrizes ferríticas, obtidas tanto no estado bruto de fusão quanto após o tratamento térmico de recozimento, possibilitam uma fácil usinagem em virtude da sua dureza relativamente baixa e da presença de silício. Quando a matriz é perlítica a usinabilidade é mais baixa e, portanto, há necessidade da redução da velocidade de corte. Quanto mais fina a microestrutura perlítica maior é esta redução. A figura 4.1 ilustra a usinabilidade da ferrita e da perlita.

Normalmente não se efetuam operações de usinagem em ferros fundidos temperados, isto devido ao fato de que o desgaste da ferramenta ocorre de maneira bem mais acentuada. Para usinar esse tipo de material efetua-se um revenimento que, de acordo com a temperatura empregada, conduz a uma estrutura perlítica um pouco melhor do que a perlita original, ambas com a mesma dureza [23].

A presença de pequenas quantidades de carbonetos livres, ou de esteadita, no ferro fundido a ser usinado, diminui a vida útil das ferramentas de corte, sendo de 5% o limite usual tolerável destes microconstituintes. A morfologia da grafita tem influência, principalmente, através de seu efeito no acabamento superficial das peças. Assim, nos ferros fundidos cinzentos, quanto maiores e mais espessos os veios de grafita pior é o acabamento superficial. Isso acarreta em alterações nas condições de usinagem, sendo necessário alterar a velocidade, o avanço e os ângulos da ferramenta de corte

para diminuir o prejuízo causado sobre o acabamento da superfície da peça usinada. Nas peças produzidas a partir dos ferros fundidos nodulares a grafita esferoidal proporciona um bom acabamento superficial, semelhante ao obtido com a grafita lamelar fina [23].

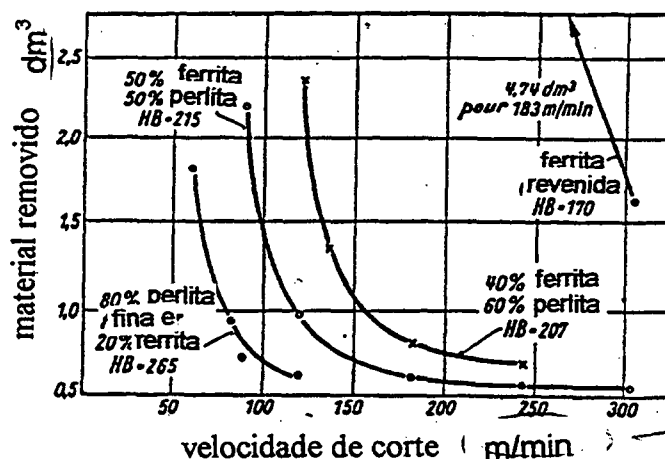


Figura 4.1 - Usinabilidade da perlita e da ferrita [18]

#### 4.1 - Influência da Microestrutura na Usinabilidade dos Ferros Fundidos

Na usinagem dos ferros fundidos a relação entre a vida da ferramenta e a velocidade de corte é diretamente afetada pela microestrutura do material usinado. Dureza é um bom indicativo das características da microestrutura e, conseqüentemente, da usinabilidade do material, porém, ela isoladamente não pode ser o fator decisivo, pois diferentes microestruturas, tendo diferentes propriedades de usinabilidade, podem ter a mesma dureza.

Diferenças na quantidade e na forma da grafita, presente na microestrutura do ferro fundido a ser usinado, influenciam significativamente na dureza do mesmo, porém, não necessariamente na vida da ferramenta utilizada [2]. Além disso, testes de dureza superficial podem não indicar adequadamente a microestrutura da superfície que será usinada subseqüentemente. A tabela 4.1 indica alguns microconstituintes do material e suas respectivas durezas.

Tabela 4.1 - Microestrutura e dureza do material [2]

MICROESTRUTURA DA MATRIZ	DUREZA BRINELL
Ferrita	120
50% ferrita e 50% perlita	150
Perlita grossa	195
Perlita média	215
Perlita fina	218
Perlita fina com 5% de carbonetos livres	240

A presença da grafita no ferro fundido é importante para sua característica de usinabilidade, porém a vida da ferramenta é dependente da microestrutura da matriz metálica em torno da grafita [28]. Os vários constituintes da matriz do material a ser usinado, bem como a influência dos mesmos sobre a vida das ferramentas, serão apresentadas a seguir:

- a) **Ferrita** - é o constituinte essencialmente livre de carbono e constitui a matriz dos ferros fundidos totalmente recozidos. Com exceção da grafita, a ferrita tem dureza inferior a qualquer outro constituinte do ferro fundido. No entanto, ela não é tão macia quanto a ferrita dos aços de baixo teor de carbono, pois, no ferro fundido, esta contém silício em sua composição. O moderado efeito de endurecimento do silício dissolvido proporciona à ferrita a propriedade de corte limpo. A influência do teor de silício nos ferros fundidos ferríticos, usualmente de 1,5% a 3%, sobre a vida da ferramenta, é muito pequena. Porém, nos ferros fundidos especiais, com alto teor de silício, é considerável. Os ferros fundidos com alto teor de silício, em torno de 14%, praticamente não são usináveis [28].
- b) **Perlita** - segundo Walton (1971), a perlita é o constituinte comum em ferros fundidos de média resistência e dureza. Ela é composta de lamelas alternadas de ferrita e cementita. A espessura das lamelas pode variar de grossa a fina. A estrutura fina é resistente, dura e é usinada a baixas velocidades. A perlita combina o melhor da usinabilidade e resistência ao desgaste [28]. A perlita, assim como o eutético de

fósforo e, também, a cementita aumentam o desgaste da ferramenta, necessitando da redução da velocidade de corte [15].

- c) **Martensita** - é o constituinte de maior dureza, obtida através da têmpera e é muito difícil de ser usinada, fator que pode ser amenizado com o revenimento. Dependendo do revenimento, a martensita pode alcançar uma usinabilidade bem superior à da perlita, ambas de mesma dureza. Quando é revenida até sua dureza alcançar valores relativamente baixos, ela forma uma estrutura de carbonetos esferoidizados em ferrita, com usinabilidade próxima à da ferrita. [28].
- d) **Estruturas aciculares** - incluindo a bainita, esses tipos de estruturas geralmente ocorre em ferros fundidos ligados ou são obtidas através da têmpera. Elas são usinadas com dificuldade, ou seja, apresentam uma usinabilidade inferior à da martensita revenida, de mesma dureza.
- e) **Austenita** - é o constituinte principal dos ferros fundidos nodulares quanto e dos ferros fundidos cinzentos com alto teor de níquel. A austenita é um constituinte relativamente macio e pode ser comparada com a ferrita em termos de usinabilidade. No entanto, alguns tipos de ferros fundidos austeníticos contém cromo suficiente para formar carbonetos de cromo na microestrutura, o que reduz a usinabilidade, inclusive, mais do que um grande aumento na dureza do material [28].
- f) **Carbonetos** - são constituintes extremamente duros. Quando nos finos planos da perlita, os carbonetos podem facilmente ser cisalhados. Porém, em partículas grandes, como constituintes isolados no ferro fundido, os carbonetos são muito prejudiciais para a vida da ferramenta de corte [28].
- g) **Matriz mista** - proporciona à ferramenta uma vida maior àquela obtida quando utilizada na usinagem dos ferros fundidos de matriz única. Por exemplo, uma ferramenta utilizada na usinagem de um material cuja matriz tem 50% de ferrita e 50% de perlita provavelmente terá uma vida menor do que quando utilizada na

usinagem de um material cuja estrutura da matriz é inteiramente ferrítica ou inteiramente perlítica, todas de equivalente proporção.

- h) **Densidade de nódulos** - para autores como Fatahalla e Hussein [11] a densidade de nódulos de grafita (nódulos/mm<sup>2</sup>) tem influência na vida das ferramentas de corte. Segundo Simonin (1976), a diminuição tanto da dureza quanto da densidade dos nódulos de grafita melhora a usinabilidade do material. E, ainda, segundo Fatahalla et al, a vida da ferramenta decresce com o aumento da densidade dos nódulos, o que é acompanhado pela formação de perlita ou cementita na matriz.

#### 4.2 - Influência da Composição Química na Usinabilidade dos Ferros Fundidos

- a) **Carbono e Silício** - o carbono e o silício promovem a formação de grafita nos ferros fundidos, a qual aumenta conforme o aumento da percentagem destes elementos, favorecendo a formação de ferro fundido cinzento. Se a quantidade de carbono e silício é diminuída abaixo de níveis críticos, ferro fundido branco será formado e a usinabilidade ficará prejudicada.

O carbono, no ferro fundido cinzento, pode existir na forma de grafita ou como carboneto de ferro. Se a grafitização é completa, o ferro fundido cinzento terá lamelas de grafita com uma matriz ferrítica, o que resultará em excelente usinabilidade [1].

Um baixo conteúdo de silício nos ferros fundidos nodulares aumenta a tendência ao coquilhamento e se bastante baixo pode causar a formação de carbonetos em excesso dentro de pequenas seções, o que prejudica a usinabilidade devido à dureza do carboneto de ferro. O silício endurece a ferrita resultando numa melhor usinabilidade deste elemento nos ferros fundidos nodulares. Ferros fundidos com alto teor de silício são difíceis de fundir e são igualmente difíceis de usar [2].

- b) **Enxofre e Manganês** - o enxofre está presente praticamente em todos os ferros fundidos, mesmo que em baixos percentuais. Para os ferros fundidos nodulares, o conteúdo de enxofre deve ser mantido muito baixo, de modo a permitir a formação da grafita esferoidal, sob a adição de magnésio. No entanto, para outros ferros fundidos, a influência do enxofre deve ser considerada quanto à sua reação com o

manganês. Sem o manganês no ferro fundido, o enxofre se combinará com o ferro para formar sulfeto de ferro ( $\text{FeS}$ ), fato que ocorre nos contornos de grão, durante o resfriamento. Quando o manganês está presente no ferro fundido, sulfeto de manganês ( $\text{MnS}$ ) precipita durante todo o processo de solidificação [1]. O sulfeto de manganês age como lubrificante durante o corte, melhorando a usinabilidade dos ferros fundidos [5]. Os efeitos tanto do enxôfre quanto do manganês, ambos agindo individualmente nos ferros fundidos, consistem em restringir a grafitização, promover a formação da perlita e estabilizar os carbonetos, portanto, são redutores da usinabilidade dos ferros fundidos [1].

c) **Fósforo** - os Ferros fundidos que contém uma quantidade suficiente de fósforo, especialmente ferros fundidos cinzentos, podem formar um eutético composto de ferro e fosfeto de ferro, denominado esteadita. A esteadita tem um baixo ponto de fusão, entre  $954^{\circ}\text{C}$  e  $980^{\circ}\text{C}$ , solidifica a uma temperatura relativamente baixa e segrega para os contornos dos grãos. Como o fosfeto de ferro é duro e frágil, um aumento na quantidade de esteadita, com percentual de fósforo acima de 0,3% no ferro fundido, pode aumentar tanto a sua dureza quanto a sua fragilidade, prejudicando sua usinabilidade [1].

d) **Estanho e cobre** - o estanho e o cobre são estabilizadores da perlita. Foi verificado que o estanho pode prejudicar a usinabilidade. Experiências mostraram que o ferro fundido ligado com cobre, cuja dureza é de aproximadamente 200 HB, apresenta a mesma usinabilidade que o ferro fundido não-ligado, com dureza de 181 HB [5].

e) **Cromo** - o cromo, nos ferros fundidos, está presente em pequenas quantidades que depende do percentual de sucata utilizada na produção desse material. A usinabilidade é prejudicada pela presença deste poderoso estabilizador de carbonetos [5].

## **CAPÍTULO 5**

### **MATERIAIS DE FERRAMENTAS EMPREGADAS NA USINAGEM DE FERRO FUNDIDO**

#### **5.1- Metal Duro e Carbonetos Revestidos**

A família de composição bifásica WC-Co é particularmente a mais indicada para ferramentas utilizadas na usinagem de materiais que causam desgaste da ferramenta primariamente devido à abrasão. Um grande grupo destes materiais é o ferro fundido. Para a usinagem de materiais ferrosos que geram cavacos curtos, como por exemplo o ferro fundido cinzento com dureza acima de 220 HB, é recomendada a classe ISO K20 [27], equivalente a classe GC3015 conforme o fabricante SANDVIK COROMANT. Para o ferro fundido nodular também é recomendada essa mesma classe de ferramenta.

Uma regra geral para todas as ferramentas de metal duro é que a tenacidade (resistência ao impacto) decresce enquanto que a resistência ao desgaste (dureza) aumenta. Ao contrário, conforme a tenacidade aumenta, a resistência ao desgaste diminui. Enquanto que é impossível alterar a forma geral da curva que estabelece esta relação, é possível estabelecer uma disposição mais favorável desta curva. Outro fator relevante a considerar no caso das ferramentas de metal duro é a aplicação de finas camadas de revestimento, as quais são duras e quimicamente muito estáveis.

Ferramentas de metal duro revestidas têm alcançado um alto padrão de qualidade, conforme evidenciado pelo fato de que 80% das pastilhas indexáveis utilizadas em processos de torneamento são revestidas [16]. O processo de revestimento predominante é o CVD (Chemical Vapour Deposition) [16].

Elevada resistência ao desgaste e a possibilidade de empregar altas velocidades de corte são vantagens significativas dos metais duros revestidos pelo processo CVD. Revestimentos CVD são, no entanto, sujeitos a tensões residuais de tração especialmente indesejáveis sob condições de corte interrompido. A inevitável desvantagem do clássico revestimento CVD contrasta com vantagens, tais como excelente aderência do revestimento ao substrato e a facilidade em depositar revestimentos duas a três vezes, os quais são tão espessos quanto aqueles obtidos



pelo processo PVD [19]. Por contraste, processos PVD de baixa temperatura praticamente não afetam as propriedades do substrato. Os revestimentos realizados por esse processo exibem tensões compressivas residuais, porém são substancialmente mais finos do que os revestimentos obtidos pelo processo CVD, na ordem de 2 a 4  $\mu\text{m}$ . A formação da estrutura e a aderência da fase dura sobre o substrato são fortemente dependentes dos parâmetros de revestimento [19].

É notável o crescente desenvolvimento de novos processos de revestimento para insertos de metal duro em que a temperatura de processamento é inferior à temperatura clássica utilizada no processo de revestimento por CVD, a qual é da ordem de 1000 °C. Como exemplos podemos citar o processo CVD auxiliado por plasma (PCVD-Plasma Chemical Vapour Deposition) que trabalha na faixa de temperatura de 700 à 500°C e o processo CVD de média temperatura (MT CVD-Medium Temperature Chemical Vapour Deposition) com temperaturas de processo na ordem de 900-700°C [16].

A capacidade de aumentar a produtividade é uma das mais importantes vantagens no uso de insertos de metal duro revestido. Como aplicações para os insertos revestidos têm-se as operações de torneamento e fresamento tanto para os ferros fundidos quanto para os aços. O sucesso dos revestimentos de simples camada conduziram ao desenvolvimento de revestimentos consistindo de duas ou mais camadas. Insertos de carbonetos com tais multicamadas, ou revestimentos multifase, podem fornecer uma melhor combinação de propriedades do que os revestimentos de camada simples.

## 5.2 - Cermet

O termo Cermet é resultante de uma combinação de pós cerâmicos e metálicos. Os materiais tipo Cermet representam uma relativa inovação na tecnologia de materiais empregados em ferramentas de corte. Eles consistem em proporções variáveis de materiais duros, tais como carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN), carboneto de tântalo (TaC), carboneto de tungstênio (WC) e carboneto de molibdênio ( $\text{Mo}_2\text{C}$ ) firmemente ligados com metais como níquel, cobalto, molibdênio e alumínio. Diferem dos materiais convencionais à base de WC empregados na fabricação de ferramentas,

que algumas vezes contêm diferentes quantidades de TiC e Ta(Nb)C ligadas por um ligante metálico (cobalto) que é líquido na temperatura de sinterização [9].

### **5.2.1 – Observação Prática dos Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Cermet**

Quando da usinagem do aço CK45 com ferramenta de Cermet a base de Ti (C,N) esta produz uma evidente performance para baixas velocidades de corte. Com o aumento da carga sobre a ferramenta, ou seja, aumentando o avanço, a velocidade de corte ou o ângulo de saída normal  $\gamma_n$  o desgaste da ferramenta de Cermet torna-se mais pronunciado [26].

O uso de um ângulo de saída positivo geralmente conduz a uma redução na vida da ferramenta, isto devido a redução na estabilidade da cunha de corte o que ocasiona lascamentos na intersecção do chanfro com o flanco, formação de sulcos especialmente no flanco principal e na quina do inserto. A estrutura de sulcos deteriora a condição tribológica entre flanco e peça, resultando em rápido crescimento do desgaste de flanco.

Na prática, segundo os referidos autores [26], as operações de torneamento de percurso curto resultaram em uma distinta dispersão dos resultados do teste de usinagem, ao aumentar este percurso aumentou a confiabilidade dos resultados. Neste caso, a carga térmica média sobre a ferramenta foi maior do que para o torneamento de percurso curto e, então, a vida da ferramenta foi reduzida, porém devido a diminuição da frequência de troca das cargas termomecânicas, o perfil de carga foi antes estacionário. Portanto, a fadiga do material da ferramenta diminuiu.

Ao contrário, o aumento dos impactos mecânicos causaram esporádicos microlascamentos do gume e, conseqüentemente, o crescimento da largura do desgaste de flanco.

Quando usinando aço de alta resistência mecânica, 42CrMoS4, com ferramenta de Cermet, a variação das condições de corte tem muito mais influência no comportamento ao desgaste quando comparado com o torneamento do aço CK45. O comportamento ao desgaste foi não só afetado pela combinação velocidade de

corte/avanço, mas também pelo ângulo de saída normal e a aplicação de fluido de corte.

O ângulo de saída negativo, para uma velocidade de corte de 315 m/min, proporcionou longos percursos da ferramenta tanto para o corte a seco como para o corte com fluido de corte. Considerando que o uso de refrigerante obviamente não teve influência sobre a relação de desgaste para baixo avanço, a dispersão do teste aumentou significativamente para alto avanço. Foi devido à elevação do ciclo de carga termomecânica que ocorreu o microlascamento do gume. O microlascamento gerou a formação de sulcos no flanco principal, resultando em rápido crescimento do desgaste de flanco da ferramenta. A aplicação de fluido de corte determinou o comportamento de desgaste do Cermet à elevada velocidade de corte.

Devido a alta temperatura de corte, o choque térmico decorrente do período de não corte foi salientado, causando trincas em forma de pente perpendiculares ao gume, segmentado-o. Conseqüentemente predominou a falha prematura da ferramenta.

Torneando com um ângulo de saída positivo geralmente ocorreu a diminuição do percurso da ferramenta de Cermet Ti (C,N), isto por causa de microlascamentos na interseção do chanfro com o flanco, fato que acelerou o crescimento do desgaste da mesma.

O Cermet a base de tântalo e carboneto de nióbio exibiu deformação plástica da quina da ferramenta após um pequeno ciclo de cargas, devido ao calor gerado sob altas forças de corte. Quebra, em consequência da deformação, pôs fim à vida da ferramenta. A ocorrência de deformação plástica e quebra poderiam ter sido adiados pela refrigeração do corte [26].

### 5.3 - Cerâmica

Ferramentas de corte cerâmicas a base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) operam em velocidades de corte superiores às das ferramentas a base de carboneto de tungstênio, ou seja, metal duro. Em muitas aplicações, isto resulta em um aumento da taxa de remoção de material. Propriedades favoráveis das ferramentas cerâmicas que promovem estes benefícios incluem boa dureza a quente, baixo coeficiente de atrito, grande resistência ao desgaste, inércia química e baixo coeficiente de condutividade

térmica. Uma grande quantidade do calor gerado durante o corte é liberado juntamente com os cavacos, resultando em menos calor gerado na peça que está sendo usinada, no inserto e no porta-ferramenta.

Outra vantagem importante está no aumento da qualidade das peças produzidas, isto devido às menores variações dimensionais resultantes do menor desgaste da ferramenta. Em adição, o acabamento superficial liso auxilia o controle dimensional. Também, ferramentas cerâmicas são capazes de usinar materiais com elevada dureza, o que elimina, em muitos casos, a necessidade de uma retificação posterior. A diferença nas propriedades de vários tipos de cerâmicas puras e compósitos permitem que sejam utilizadas em uma grande gama de aplicações. Insertos de cerâmica pura prensada a frio têm menos resistência a choques térmicos do que os insertos de cerâmica composta prensada a quente. Porém, os primeiros são mais resistentes ao desgaste quando utilizados na usinagem de aços e ferros fundidos macios [2]. Muitos trabalhos encontram-se disponíveis na literatura abordando a utilização das cerâmicas brancas, a base de óxido de alumínio e mistas. Como exemplos desses materiais citam-se [24]:

a) **Ferramentas de corte cerâmicas reforçadas com “whisker”** - o mais recente material de ferramenta cerâmica a surgir no mercado é um compósito reforçado com “whisker” (fibras de SiC) recomendado para a usinagem de ligas a base de níquel. Também tem sido notificado um bom desempenho no torneamento de aços endurecidos e no torneamento e fresamento de ferro fundido. Este material consiste de uma matriz de alumina contendo 25%, em volume, de “whisker” de carboneto de silício (SiC). Ele não somente mostra resistência a elevadas temperaturas como também um baixo coeficiente de expansão térmica, propriedade que é muito desejável em materiais para ferramentas de corte. Juntamente com isso, está o melhoramento da condutividade térmica desse material que é em torno de 40% superior à da alumina pura. A combinação destes dois fatores melhora a resistência a choques térmicos do compósito quando comparado com cerâmica de alumina sem reforço. Uma indicação da tenacidade térmica do material é a recomendação geral para usar fluido de corte no intuito de prevenir distorções na peça e auxiliar a remoção dos cavacos. A principal vantagem do reforço com “whisker”, no entanto, é

o melhoramento da tenacidade da ferramenta quando submetida à impacto, ou seja, corte interrompido [20].

b) **Ferramenta de cerâmica de nitreto de silício** - nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) tem sido reconhecido como um dos materiais cerâmicos mais tenazes. Melhorias na dureza, resistência ao desgaste abrasivo e inércia química têm produzido um material com elevada qualidade e muito recomendável na produção de ferramentas de corte. O caráter da ligação, altamente covalente, e a baixa autodifusividade fazem dele um material difícil de ser sinterizado quando comparado com cerâmicas óxidas. Aditivos são utilizados para melhorar a densidade do material da ferramenta, o que é importante desde que as propriedades termo-mecânicas venham a sofrer um decréscimo conforme o aumento da porosidade.

Cerâmicas de nitreto de silício são materiais bifásicos, consistindo de cristais de nitreto de silício e uma fase de ligação intergranular. A fase intergranular é um vidro, ou em parte vidro, cristalizado à base de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e uma combinação de auxiliares de sinterização, tais como, alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), yttria ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) e magnésio ( $\text{MgO}$ ). Os materiais de maior importância neste grupo são: nitreto de silício, yttria, oxinitreto de silício e alumina. Uma das principais características dos materiais “sialon” é seu baixo coeficiente de expansão térmica (tipicamente um terço do que o da alumina e a metade daquela para o metal duro). O material tem alta condutividade térmica, propriedade que minimiza as tensões entre as partes quente e fria de um inserto, proporcionando boa resistência a choques térmicos.

Ensaio com ferramentas cerâmicas empregadas na usinagem de discos de compressores feitos em “Incoloy 901” têm sido realizados na Universidade de Warwick. Nesta ocasião, as ferramentas de metal duro que foram utilizadas para usinar as peças numa velocidade de corte de 30 m/min e com avanço de 0,25 mm/rot, tiveram uma vida de 20 minutos. Estas foram substituídas por ferramentas de sialon, que trabalharam na velocidade de corte de 310 m/min e com avanço de 0,18 mm/rot, as quais tiveram uma vida de 4 minutos. O fato de que a taxa de remoção de material foi aumentada por um fator de 7 foi notificado como compensador na diminuição da vida da ferramenta [20].

Embora, nas últimas décadas, conforme descrito, tenha ocorrido um enorme desenvolvimento nos materiais cerâmicos para aplicação na fabricação de ferramentas para usinagem, o campo de aplicação ainda é bastante desconhecido e específico para

determinados tipos e composições desses materiais. Existem fortes indicativos quanto aos notáveis potenciais dessas cerâmicas como ferramentas para usinagem, porém, muitos desses ainda precisam ser elucidados através de pesquisas. No entanto, isto significa que a utilização dos mesmos sempre deve ser realizada com cautela e na medida do possível baseado em experiências anteriores, relatadas em trabalhos de pesquisa. Outra medida importante é a interação com os fabricantes dessas ferramentas, ao menos com a documentação técnica desses fabricantes, que muitas vezes é de extrema importância para resolver dúvidas específicas.

### **5.3.1 – Mecanismos de desgaste das Cerâmicas**

Materiais de corte cerâmicos são de alto interesse em engenharia de produção devido às altas velocidades de corte aplicáveis. Isto conduz a altas taxas de remoção de material [6].

Materiais cerâmicos usados como ferramentas de corte são a base de óxido de alumínio e nitreto de silício. Os sub-grupos desses materiais diferem pela composição, processo de fabricação e propriedades. Como consequência das propriedades específicas destes materiais cerâmicos existem distintos tipos de desgaste e gamas de aplicação. Em comparação com os tradicionais materiais de ferramentas, tais como aços-rápidos e carbonetos, as mais importantes vantagens das cerâmicas são sua alta resistência ao desgaste, alta resistência a quente e alta estabilidade química. Desvantagens críticas são a dureza específica da cerâmica e característica de material frágil que causam baixa resistência à tração, alta resistência à compressão e baixa tenacidade. Ferramentas de corte tem que resistir a um grande espectro de cargas mecânicas, térmicas e químicas.

O tipo específico de desgaste e o comportamento ao desgaste de um material de ferramenta é determinado pelas propriedades do material da ferramenta e do material da peça. Assim, ferramentas de corte óxidas e de nitreto apresentam característicos comportamentos ao desgaste, os quais são causados por específicos campos de aplicação [6].

Uma ferramenta típica de óxido desgastada mostra uma regular abrasão no flanco e na face, um pequeno desgaste de cratera, trincas e, em algumas vezes, um

sulco na extremidade da largura de corte, oposta a quina da ferramenta. O desgaste de cratera aumenta no corte interrompido. No corte contínuo as trincas tomam uma direção predominantemente paralela ao gume, enquanto que no corte interrompido elas ocorrem perpendicularmente ao gume. Como consequência da formação de trincas ocorre a fratura da ferramenta, o que conduz a uma falha imprevista e diminui a confiabilidade das ferramentas de alumina.

O comportamento ao desgaste das ferramentas de nitreto de silício é caracterizado por um crescimento regular do desgaste tanto no flanco como na face. Esse comportamento ao desgaste é altamente dependente do material da peça usinada, sendo que os aços geram rápido aumento desses desgastes, proporcionando vida curtas às mesmas. Ao contrário, no corte do ferro fundido cinzento estas ferramentas obtêm altas vidas com altas taxas de remoção de material [6].

## **CAPÍTULO 6**

### **METODOLOGIA, CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E EQUIPAMENTOS**

#### **6.1 - Metodologia**

Os experimentos de torneamento realizados neste trabalho, para caracterizar a usinabilidade do ferro fundido FE-50007, foram de longa duração porque representam melhor as condições praticadas na indústria. Para a execução desses testes foi utilizado um torno com variação contínua de velocidade e de boa rigidez. Para caracterizar a usinabilidade do referido ferro fundido nodular foram utilizados três tipos de materiais de ferramentas de corte: metal duro, Cermet e cerâmica. As condições de corte foram escolhidas de tal forma que a vida da ferramenta recaísse numa faixa de valores economicamente praticáveis na indústria.

Como um dos objetivos deste trabalho foi comparar a usinabilidade entre dois materiais distintos, o ferro fundido e o aço ABNT 1045, na seleção das condições de corte foi observada a coincidência de velocidades, avanços e profundidades de corte nos testes desses dois tipos de materiais.

Como os corpos de prova de ferro fundido não apresentaram uma estrutura homogênea, optou-se por usiná-los por camadas. Assim, a sua seção transversal foi dividida em três camadas de 7,5 mm de espessura cada uma, ocorrendo, desta forma, ensaios na 1ª camada, 2ª camada e na 3ª camada, nas velocidades de corte de 225, 250 e 280 m/min, com avanço de 0,2 mm/rot e profundidade de corte de 2,5 mm para todos os ensaios.

Tais ensaios consistiram em medir o desgaste de flanco das diversas ferramentas utilizadas em diferentes intervalos de tempo de usinagem. Para isto, a ferramenta era removida do torno e levada a um microscópio de ferramentaria onde se procedia a medição do desgaste de flanco, repetindo-se esta operação até que o desgaste de flanco alcançasse um valor em torno de 0,3 mm. A medição de desgaste era acompanhada pela medição do tempo de usinagem para cada passe, sendo que desta forma reuniu-se um conjunto de dados “tempo de corte/desgaste”, os quais retratam o desempenho da ferramenta em cada camada usinada, com uma dada



velocidade de corte. Também foram efetuados ensaios para medição das forças de corte tanto para o ferro fundido nodular quanto para o aço ABNT1045, utilizando-se um dinamômetro piezelétrico. Os ensaios foram efetuados tomando-se o valor da força de corte para diversos avanços pré-estabelecidos. Os resultados foram utilizados na construção de gráficos bilogarítmicos e possibilitaram a determinação da equação de Kienzle para o aço 1045 e para as diferentes camadas do ferro fundido nodular.

## 6.2 - Caracterização dos Materiais

### 6.2.1 - Ferro fundido nodular ABNT FE-50007

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de usinagem tinham um diâmetro inicial de 102 mm e um comprimento de 700 mm. Antes de iniciar os testes de usinagem removeu-se a camada em bruto, resultante da fundição, dos corpos de prova. Esta operação foi realizada no mesmo torno em que foram realizados os citados testes. A composição química, dureza, microconstituintes e resistência mecânica deste material são apresentadas a seguir:

a) **Composição química do ferro fundido nodular ABNT FE-50007** - a análise da composição química do material em estudo foi realizada pelo próprio fornecedor e também fabricante do material, a Indústria de Fundição Tupy. Ltda sediada em Joinville/SC. É importante ressaltar que os elementos constituintes e respectivos percentuais contidos na tabela 6.1 encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma ABNT NBR 6916.

Tabela 6.1 - Composição química do ferro fundido nodular ABNT FE-50007

COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg
3,7 - 3,9	2,7 - 3,0	0,2 máx	0,025 máx	0,05 máx	0,05 máx	0,04 - 0,07

b) **Dureza do material** - com o propósito de melhor caracterizar as propriedades físicas e as características da microestrutura do material foram utilizados dois métodos para a medição de dureza, quais sejam, Brinell e micro-Vickers. Para a medição utilizando o primeiro método é importante mencionar que a medida da dureza Brinell do ferro fundido nodular nos fornece uma média da dureza na região de interesse, pois a esfera de 2,5 mm de diâmetro utilizada por este método de medição abrange uma área maior na microestrutura, podendo atingir várias fases simultaneamente, ou seja, macrodureza. Para a execução da medição de dureza Brinell foram utilizados cinco corpos de prova e as medidas foram efetuadas ao longo de seis pontos radiais, distribuídos uniformemente ao longo da seção transversal dos corpos de prova, conforme mostra a figura 6.1.

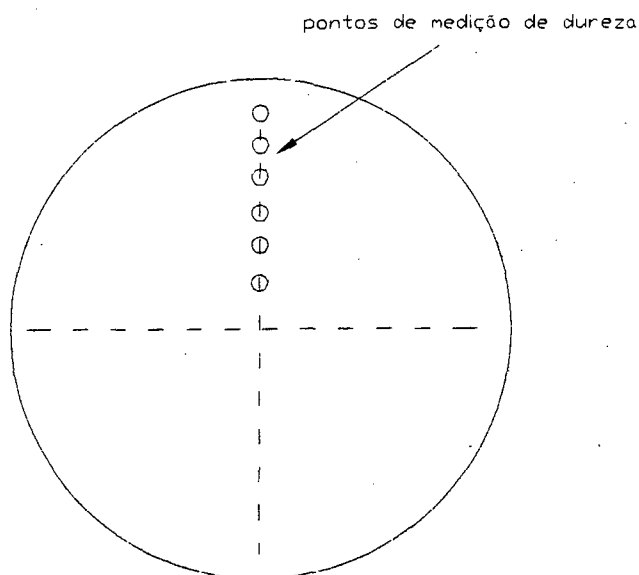


Figura 6.1 – Posicionamento dos pontos radiais de medição da dureza Brinell ao longo da seção transversal

Os resultados das medições de dureza efetuadas nos corpos de prova são mostrados a seguir, tabela 6.2.

Tabela 6.2 - Dureza Brinell do ferro fundido nodular (esfera de  $\phi=2,5$  mm), em N/mm<sup>2</sup>

PONTO	CORPO DE PROVA Nº					MÉDIA	$\sigma$
	1	2	3	4	5		
1( $\phi=96$ )	210	204	191	201	198	200,8	7,0
2( $\phi=80$ )	210	185	188	204	191	195,6	10,8
3( $\phi=66$ )	210	185	185	210	207	199,4	13,2
4( $\phi=52$ )	218	210	198	204	210	208,0	7,4
5( $\phi=38$ )	218	191	191	201	201	200,4	11,0
6( $\phi=24$ )	218	204	188	204	204	203,6	10,6
7( $\phi=10$ )	218	204	179	191	204	199,2	14,7

Conforme pode-se observar através dos resultados obtidos, tabela 6.2, o método de dureza Brinell detectou uma certa dispersão na dureza do material ao longo da seção transversal. Esta dispersão é da ordem de até 10% entre os valores obtidos sobre um mesmo raio de medição para os diferentes corpos de prova, assim como nos diferentes pontos de medição de um mesmo corpo de prova. Esta dispersão também está representada no desvio-padrão da tabela 6.2. A dureza média do material encontra-se dentro da faixa de valores estabelecidos pela norma ABNT. Estes valores foram obtidos no laboratório de materiais da UFSC.

Para se obter apenas a dureza da matriz, isto é, o espaço entre os nódulos, deve-se utilizar o método da microdureza Vickers. Para a execução da medição de micro-dureza Vickers utilizou-se um penetrador piramidal de 136°. Foram feitas medições por camadas, já que os corpos de prova foram divididos em três camadas radiais de 7,5 mm cada uma, conforme mostra a figura 6.2. Os resultados obtidos com este método de medição encontram-se na tabela 6.3.

Os resultados de microdureza obtidos na matriz do ferro fundido nodular FE-50007, tabela 6.3, mostraram que existem três regiões distintas ao longo da seção transversal dos corpos de prova, caracterizando-se por uma camada externa mais dura, uma dureza média na camada intermediária e uma dureza menor na camada mais interna, isto é, no núcleo dos corpos de prova. Além disto, observou-se, também, uma dispersão relativamente alta entre os valores individuais obtidos na medição. Estes resultados se devem ao tipo de microestrutura em cada região do corpo de

prova, denotando uma fase com características específicas presente em cada ponto de medição.

Tabela 6.3 - Micro-dureza Vickers do ferro fundido nodular (penetrador piramidal de 136°, carga de 200g)

MEDIDAS			MÉDIA	MÉDIA POR CAMADAS	CAMADAS
293	410	344	349,0	297,5	primeira
219	245	347	270,3		
337	236	247	273,3		
281	251	201	244,4	241,9	segunda
213	326	242	260,4		
207	225	231	221,0		
238	236	199	224,4	227,7	terceira
192	242	198	210,7		
224	353	167	248,0		

c) **Microestrutura do material** - com a finalidade de aprofundar os estudos sobre a microestrutura do ferro fundido nodular em questão, bem como suas conseqüências durante a usinagem, foi determinado, quantitativamente, o percentual de cada fase presente e a densidade de nódulos de grafita, conforme ilustrado na tabela 6.4. Este levantamento foi realizado em Joinville/SC pela Indústria de Fundição Tupy Ltda.

Este estudo permitiu concluir que na camada externa existe um alto percentual de ferrita e nódulos de grafita, além da cementita. Na camada intermediária surge uma pequena variação do percentual de ferrita, isto em relação à camada anterior, aparece um baixo percentual de perlita e uma quantidade média, em relação às outras duas camadas, de nódulos de grafita. Na camada interna tem-se o maior percentual de perlita, assim como um menor percentual de ferrita e de nódulos de grafita. A figura 6.2 apresenta a distribuição dessas fases na microestrutura do FE-50007, em estudo. Por sua vez as figuras. 6.3 a 6.11 apresentam, em detalhes, as diferentes microestruturas encontradas nas diversas regiões dos corpos de prova utilizados nesses ensaios de torneamento.

Tabela 6.4 - Microconstituintes do ferro nodular e densidade de nódulos de grafita.

MATRIZ	PROFUNDIDADE (mm)								
	1ª camada			2ª camada			3ª camada		
PROFUND. (mm)	3,5	6,0	8,5	11,0	13,5	16,0	18,5	21,0	23,5
FERRITA(%)	90	90	94	94	95	90	85	85	75
PERLITA(%)	-	-	3	3	5	10	15	15	25
CEMENTITA(%)	10	10	3	3	-	-	-	-	-
NÓD./mm <sup>2</sup>	425	412	404	389	374	322	212	195	135

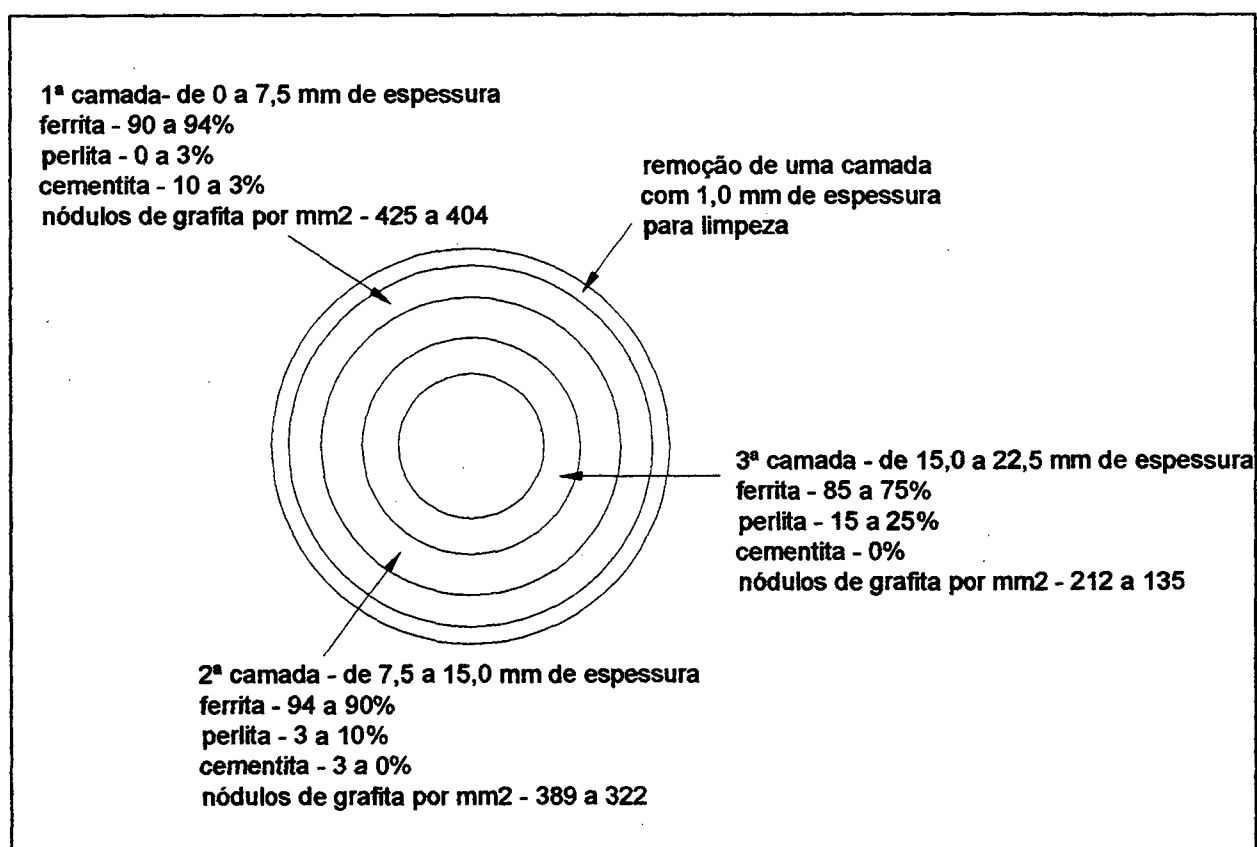


Figura 6.2 – Seção transversal do corpo de prova e sua divisão em camadas

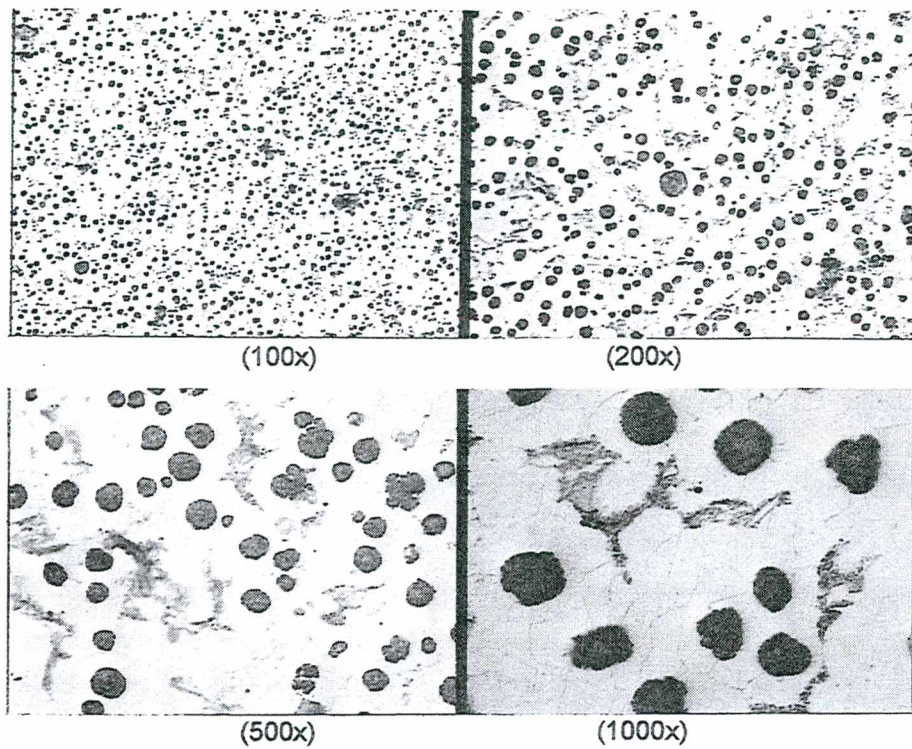


Figura 6.3 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 3,5 mm, reagente: nital a 2%

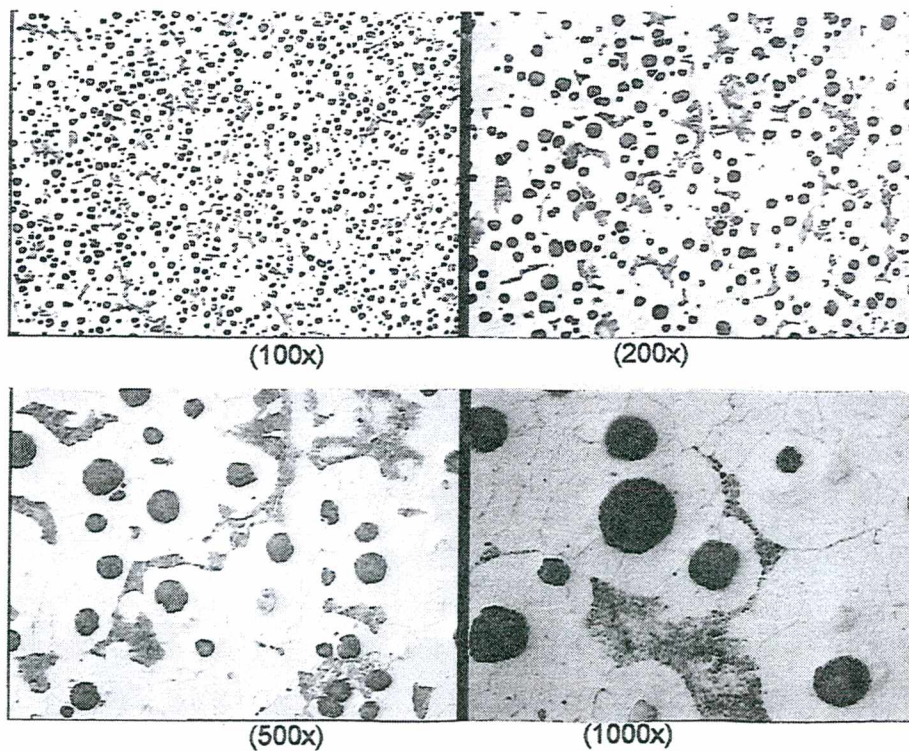


Figura 6.4 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 6,0 mm, reagente: nital a 2%



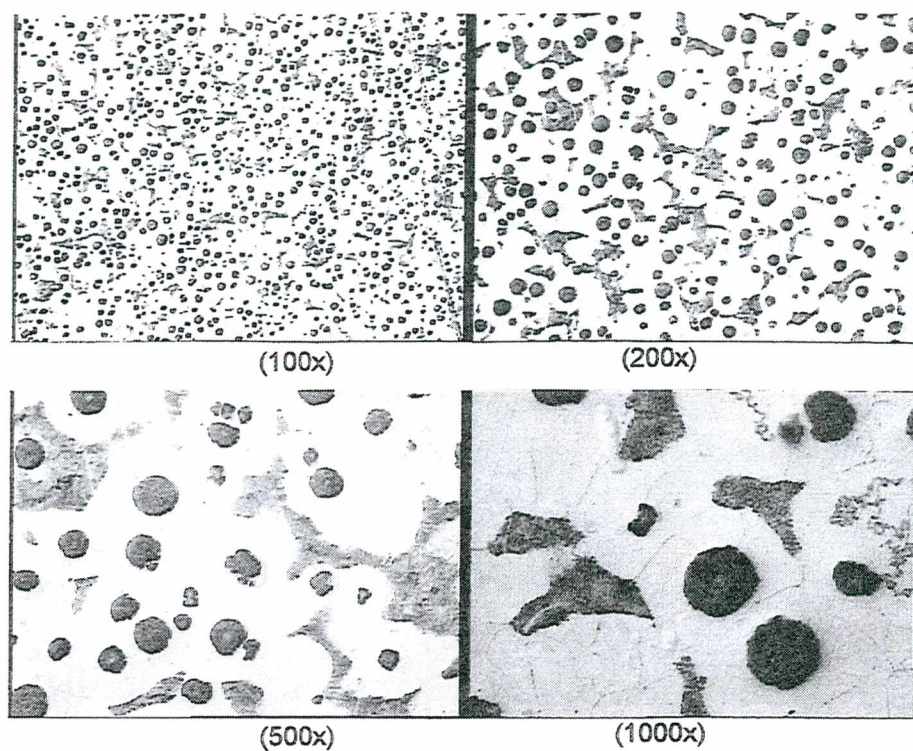


Figura 6.5 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 8,5 mm, reagente: nital a 2%

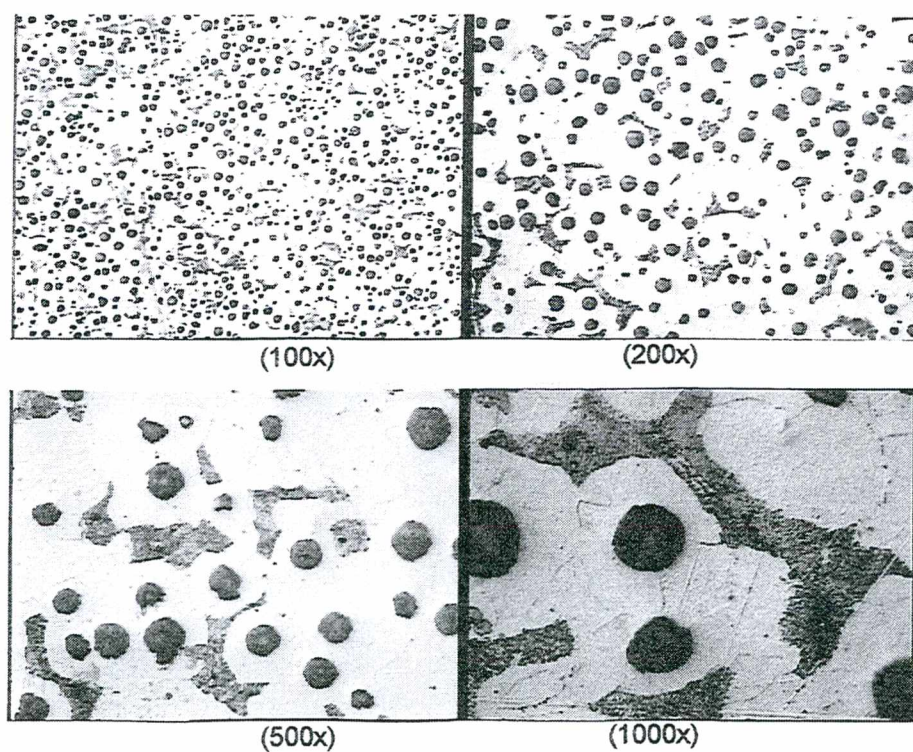


Figura 6.6 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 11,0 mm, reagente: nital a 2%



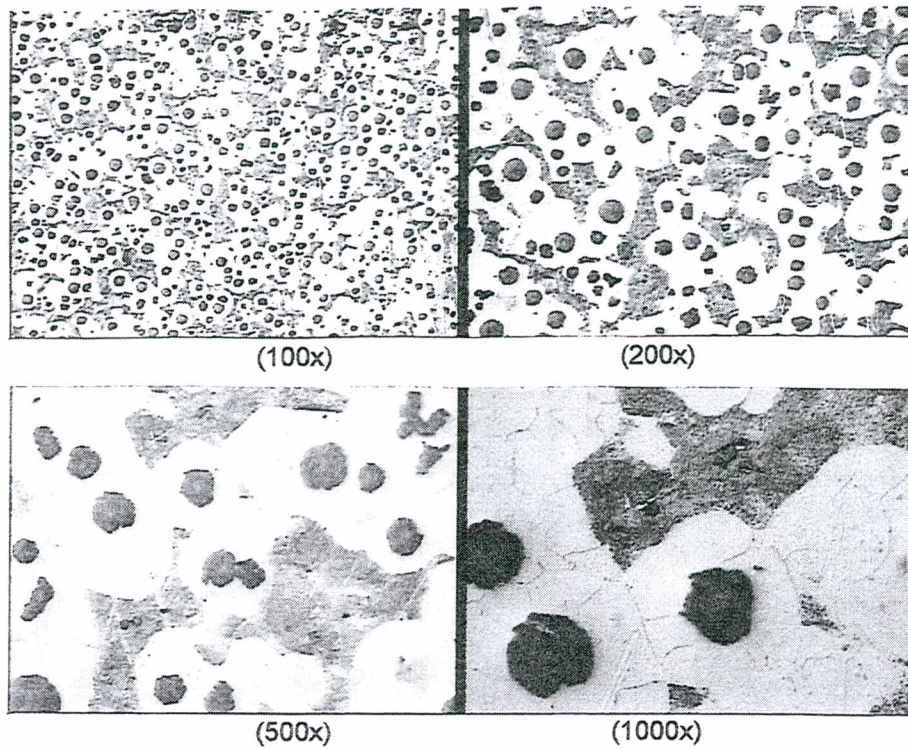


Figura 6.7 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 13,6 mm, reagente: nital a 2%

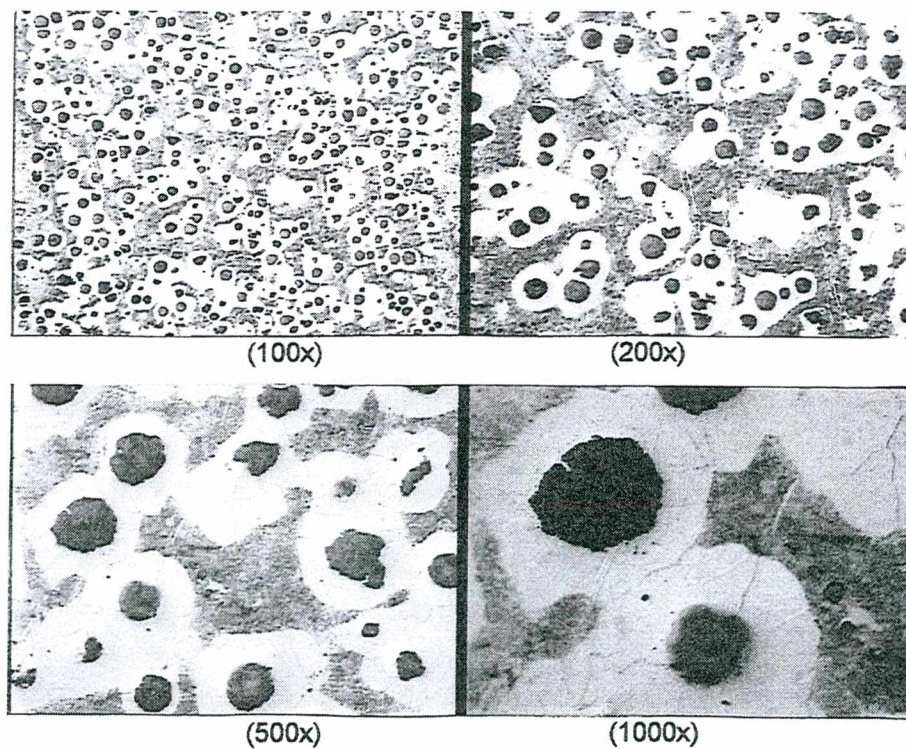


Figura 6.8 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 16,0 mm, reagente: nital a 2%



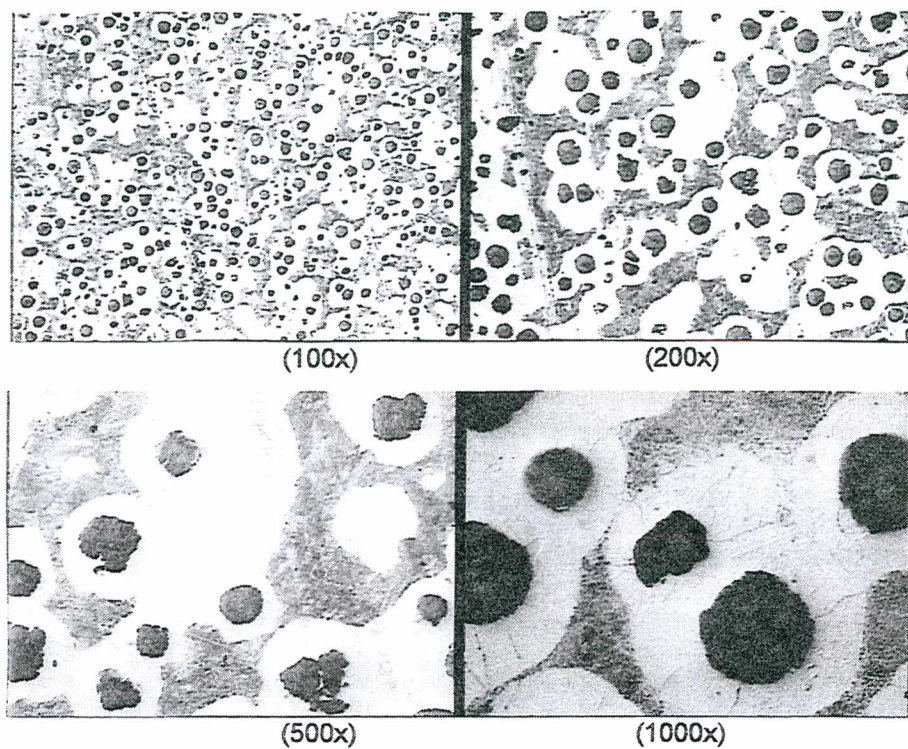


Figura 6.9 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 18,5 mm, reagente: nital a 2%

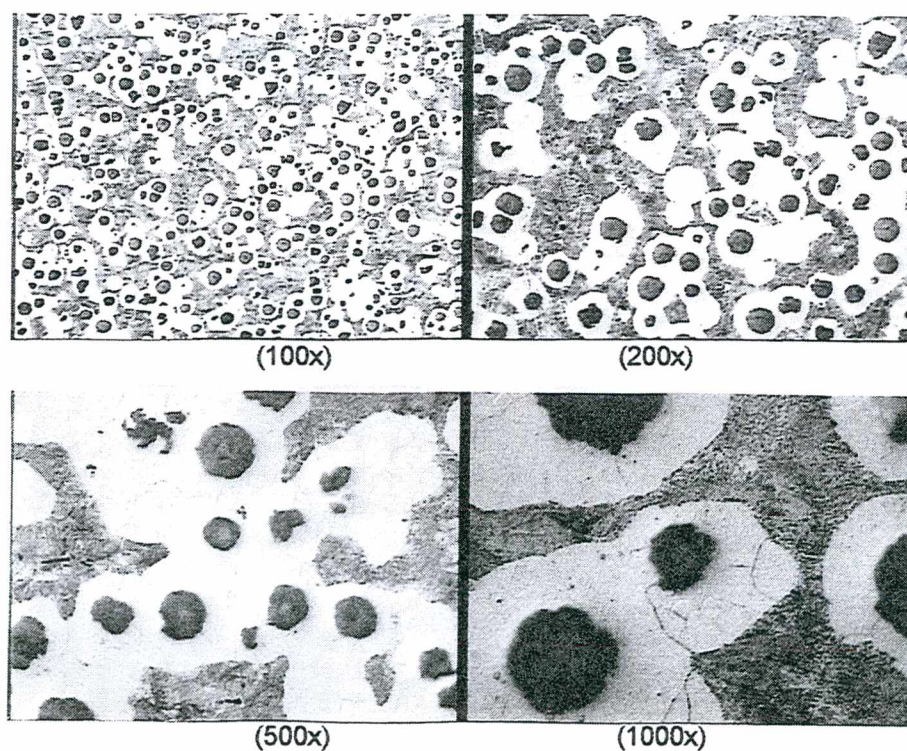


Figura 6.10 – Microestrutura do ferro fundido nodular Fe-50007, na profundidade de 21,0 mm, reagente: nital a 2%



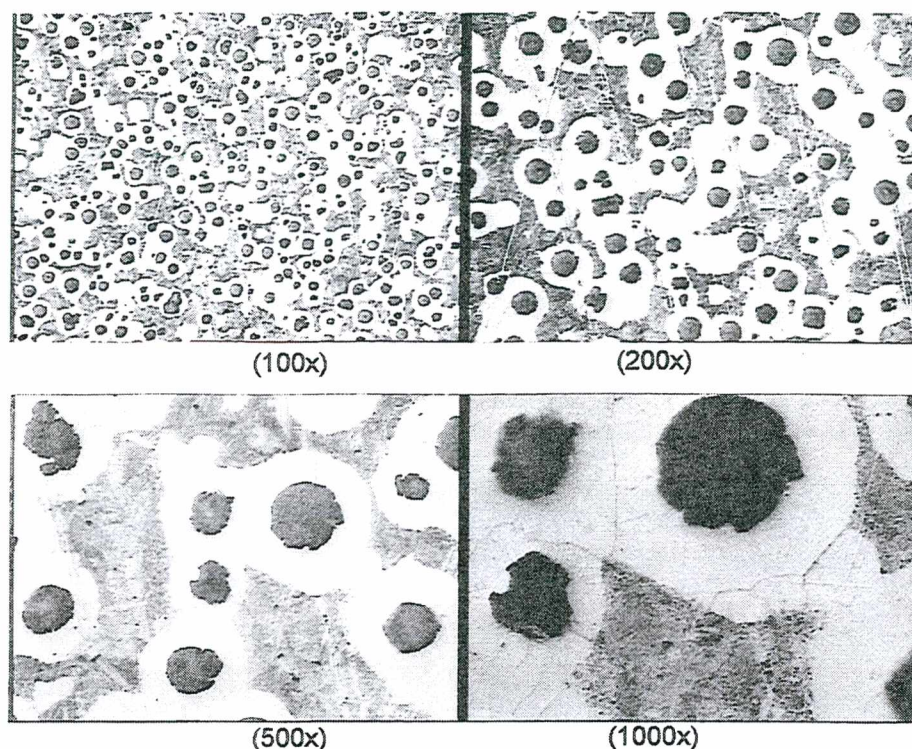


Figura 6.11 – Microestrutura do ferro fundido nodular FE-50007, na profundidade de 23,0 mm, reagente: nital a 2%

d) **Resistência à tração e ao alongamento do material** - a resistência à tração e o alongamento do material foram determinados em corpos de prova especialmente fabricados para tal finalidade, em conformidade com as normas ABNT e NBR 6152. O material utilizado para fabricá-los foi obtido da parte central, ou seja, do núcleo dos corpos de prova utilizados nos ensaios de usinagem. Obteve-se os seguintes resultados: resistência à tração de 596 MPa; alongamento de 7,2%. Estes resultados representam os valores médios medidos em três corpos de prova e encontram-se dentro da faixa de valores estabelecidos em normas para o ferro fundido FE-50007. Esta análise foi realizada em Joinville-SC na Indústria de Fundição Tupy Ltda.

### 6.2.2 - Aço ABNT 1045

Para efeito de comparação da usinabilidade do ferro fundido nodular FE-50007 utilizou-se o aço ABNT 1045, NBR 6006, laminado a quente, comercial. Este material foi utilizado na forma de corpos de prova que possuíam um diâmetro inicial de 76 mm e comprimento de 400 mm, os quais eram pré-usinados para remover a camada superficial decorrente da laminação. A sua composição química é mostrada na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 - Composição química do aço 1045 (% em peso).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mg	Cu	Mo	Ni
0,46	0,12	0,74	0,01	0,027	0,033	-	0,03	0,006	0,015

Os testes de resistência à tração apresentaram valores na faixa de 613 a 624 MPa. Já o alongamento situou-se na faixa de 21,5% a 19,8%. Tanto a composição química quanto a resistência e o alongamento encontram-se dentro da faixa de valores especificados em normas para este tipo de material. Verificou-se, portanto, que a resistência mecânica do ferro fundido nodular FE-50007 é da mesma ordem de grandeza do aço ABNT 1045, respectivamente, 596 MPa e 618,5 MPa (valor médio), ou seja, uma diferença percentual inferior a 4%. Trata-se, assim, de materiais com propriedades mecânicas semelhantes, conforme inicialmente previsto.

### 6.3 - Equipamentos Utilizados nos Ensaios

Os equipamentos utilizados nos experimentos, assim como as suas características, encontram-se no Apêndice I. Neste mesmo Apêndice são apresentadas as ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular FE-50007 e do aço ABNT 1045.

#### 6.4 - Aferição do Dinamômetro de Kistler

A aferição foi realizada para cada componente da força de usinagem, ou seja,  $F_c$ ,  $F_a$  e  $F_p$ .

Com o auxílio de uma balança e pesos aferidos foi carregada a plataforma dinamométrica. O sinal era amplificado e indicado no Indicador Analógico. De acordo com o valor esperado das forças, aferiu-se as diversas escalas do amplificador. Um ajuste na sensibilidade do amplificador combinada com a sensibilidade do dinamômetro possibilitou ajustar, ao longo da escala, o valor análogo indicado com o valor da força aplicada no dinamômetro. O valor obtido para o amplificador, em cada escala, deveria ser repetido por ocasião do uso da referida escala [29].

Tendo-se os valores reais das cargas e os valores medidos pelo sistema de aquisição de dados, levantou-se as curvas de erro e com isso realizou-se as correções dos valores medidos no processo.

A aplicação das forças com pesos padrões foram executadas nos três eixos (x, y e z) [29].

## CAPÍTULO 7

### APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os ensaios para a caracterização da usinabilidade do Ferro Fundido Nodular FE-50007 e do Aço ABNT 1045 foram realizados com diferentes tipos de materiais e geometria de ferramentas de corte. Dentre os materiais podemos citar os seguintes grupos principais: metal duro, cerâmica e Cermet. No entanto, a ênfase desta pesquisa concentrou-se no estudo da usinabilidade do Ferro Fundido FE-50007, com pastilhas de metal duro SNMA120408, sem quebra-cavacos, da classe ISO K20 (GC3015). Esta é uma pastilha com dupla camada de revestimento, produzida pela Sandvik-Coromant [21], cuja camada externa é de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e possui sobre o substrato uma camada de carboneto de titânio (TiC). Neste caso, os ensaios foram realizados em três velocidades de corte distintas e como há diferença na microestrutura da periferia para o centro dos corpos de prova, devido aos diferentes tempos de resfriamento do material, conforme mencionado no item 6.2.1, os corpos de prova foram divididos, ao longo da sua seção, em três camadas de 7,5 mm de profundidade (espessura) cada uma, as quais foram pesquisadas separadamente. Em cada camada foram realizados três passes com 2,5 mm de profundidade de corte. Para justificar esse procedimento realizou-se a análise micrográfica, a qual mostrou uma nítida distinção entre estas três camadas, conforme ilustra a tabela 6.4. Na primeira camada têm-se a presença, além da ferrita, da cementita, que é um componente muito duro. Na segunda camada, juntamente com a ferrita em teores mais baixos, aparece como constituinte da matriz a perlita, que é um microconstituente de menor dureza que a cementita. Finalmente, a terceira camada desse material revelou a presença de ferrita e de um alto teor de perlita. Por sua vez, a quantidade de nódulos de grafita diminui da periferia para o núcleo dos corpos de prova, conforme ilustra a figura 6.2 do capítulo 6.

Complementarmente foram utilizadas, na usinagem do referido Ferro Fundido, pastilhas de metal duro, também produzidas pela Sandvik-Coromant [21], das classes ISO K20 (GC4025) com revestimento externo de  $Al_2O_3$  e com uma camada de revestimento de Ti(C,N) sobre o substrato, ISO K15 (GC4015) com revestimento externo de TiN e sobre o substrato uma camada de  $Al_2O_3$ . Pastilhas de Cermet CT525,

pastilhas cerâmicas à base de nitreto de silício CC690 e SL100 e pastilhas de óxido de alumínio SN80, sendo as duas últimas fabricadas pela SPK-Feldmuhle [25].

No aço ABNT 1045 os ensaios de usinabilidade foram realizados com as mesmas pastilhas GC3015, GC4025 e GC4015.

A tabela 7.1 mostra um resumo dos testes que foram efetuados, podendo-se obter o tipo de inserto, as velocidades de corte utilizadas, o tempo de usinagem e o desgaste alcançado no flanco de cada ferramenta. Os valores de desgaste de flanco obtidos experimentalmente para os diferentes materiais de ferramentas e peças são apresentados no apêndice II.

Também, procurou-se estabelecer uma comparação entre a usinabilidade dos dois tipos de materiais, utilizando como parâmetros de referência o desgaste de flanco das ferramentas e a força específica de corte.

As ferramentas foram utilizadas em três velocidades de corte distintas, a saber, 225, 250 e 280 m/min, as quais estão situadas na faixa de velocidades recomendadas pelo fabricante dos insertos. O avanço e a profundidade de corte, respectivamente de 0,2 mm e 2,5 mm, foram mantidos constantes em todos os testes efetuados.

Tabela 7.1 - Resumo dos ensaios;  $f = 0,2$  mm,  $a_p = 2,5$  mm

EXPER.	PASTILHA	CAMADA	$V_c$ (m/min)	t (min)	VB (mm)	MATERIAL
1	GC3015	1	250	28	0,30	fofo
2	GC3015	2	250	30	0,34	fofo
2'	REPLICA	2	250	32	0,34	fofo
2''	GC3015	3	250	21	0,30	fofo
3	GC3015	1	280	14	0,31	fofo
3'	REPLICA	1	280	14	0,29	fofo
4	GC3015	2	280	17	0,31	fofo
4'	REPLICA	2	280	17	0,33	fofo
5	GC3015	3	280	14,4	0,32	fofo
6	GC3015	1	225	50	0,35	fofo
6'	GC3015	2	225	40	0,32	fofo
7	GC3015	3	225	38	0,37	fofo
8	GC4025	-	250	50	0,20	aço
9	GC4025	1	250	8	0,36	fofo

9'	RÉPLICA	1	250	8	0,30	fofo
9"	GC4025	2	250	8,4	0,38	fofo
10	SN80	1	250	14	0,47	fofo
10'	REPLICA	1	250	11,4	0,49	fofo
10"	SN80	1	280	6,8	0,39	fofo
11	SL100	1	250	2	0,48	fofo
12	GC4015UM	2	250	19,2	0,36	fofo
13	GC4015UR	2	250	17,8	0,32	fofo
14	GC4015UR	2	250	35,3	0,26	aço

### 7.1 - Usinagem do Ferro Fundido FE- 50007 com Pastilha de Metal Duro GC3015

Analisando-se a tabela 7.1, das várias ferramentas testadas na usinagem do ferro fundido nodular, a que apresentou melhores resultados foi a pastilha GC3015, uma vez que o seu tempo de vida foi mais longo do que o das demais pastilhas. Estes resultados serão discutidos mais detalhadamente a seguir.

A figura 7.1 apresenta a curva de vida e a equação de Taylor reduzida da ferramenta GC3015 utilizada na usinagem da primeira camada do referido ferro fundido, a qual contém alto teor de cementita, nas velocidades de 225, 250 e 260 m/min. Os valores do tempo de vida "T" para a primeira camada dessa ferramenta foram extraídos da figura 7.2. Tendo-se o valor de desgaste de flanco VB de 0,2 mm, para cada curva referente as velocidades de corte empregadas, obtêm-se, na ordenada do gráfico, o valor de T.

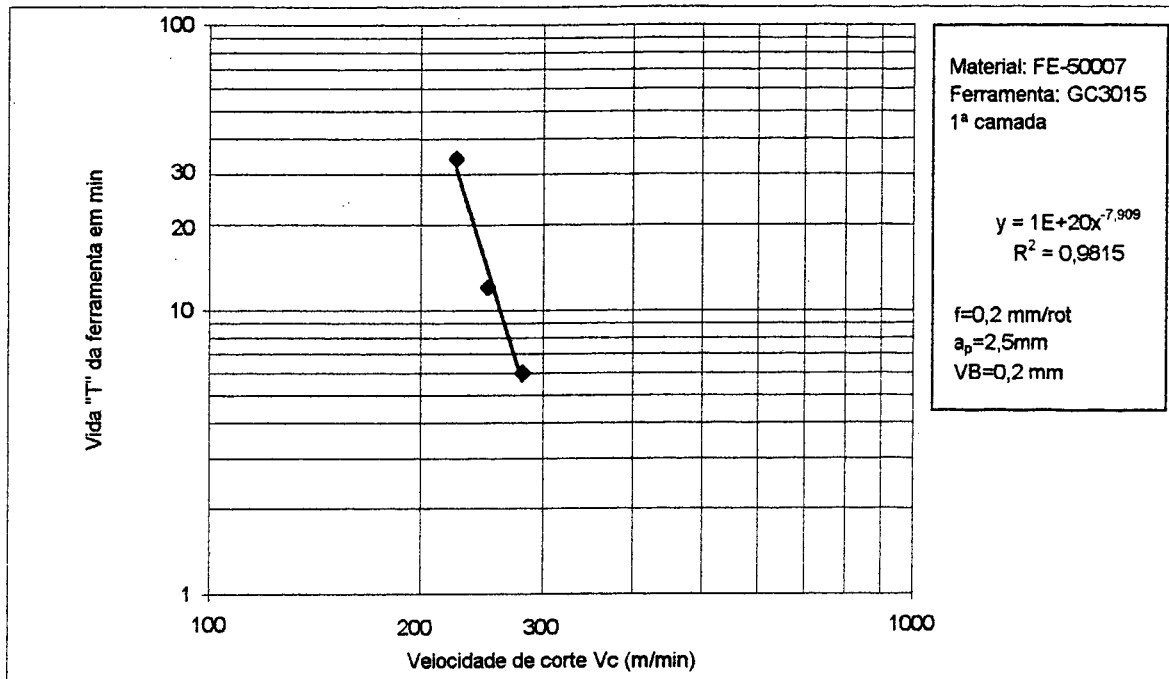


Figura 7.1 – Curva de vida e equação de Taylor reduzida para o par metal duro GC3015/ Ferro Fundido Nodular.

### 7.1.1 – Efeito da velocidade de corte sobre o desgaste das ferramentas

Na primeira camada tem-se um comportamento bem diferenciado das curvas de desgaste x tempo de usinagem para as três velocidades de corte utilizadas, conforme ilustra a figura 7.2. Este comportamento está diretamente associado a dois fatores principais:

a) Na medida em que aumenta a velocidade de corte ocorre uma maior solicitação térmica sobre a ferramenta e, conseqüentemente, uma intensificação do seu desgaste, fato já amplamente conhecido e discutido na literatura de usinagem;

b) No caso da primeira camada dos corpos de prova existe a presença de uma significativa quantidade de cementita na microestrutura, na porcentagem de 10 a 3%, que certamente contribui para o aumento da intensidade do desgaste das ferramentas, principalmente para as maiores velocidades. Considera-se que este efeito não foi maior devido à grande quantidade de nódulos de grafita nessa camada, 404 a 425 nódulos por milímetro quadrado, os quais proporcionam um efeito lubrificante e,



conseqüentemente, atuam como um redutor do desgaste da ferramenta. Destaca-se que para a velocidade de 280 m/min a ferramenta atinge um desgaste VB de 0,3 mm em apenas 15 min de usinagem. Já para as velocidades de 250 m/min e 225 m/min obtêm-se, para o mesmo valor de desgaste, tempos de usinagem de 28 e 48 min, respectivamente. Este resultado leva a concluir que acima de 280 m/min a vida da ferramenta é bastante reduzida, tornando-se economicamente inviável o uso de velocidades superiores a esta devido à maior intensidade de trocas de ferramentas e, conseqüentemente, sucessivas paradas durante o processo de usinagem.

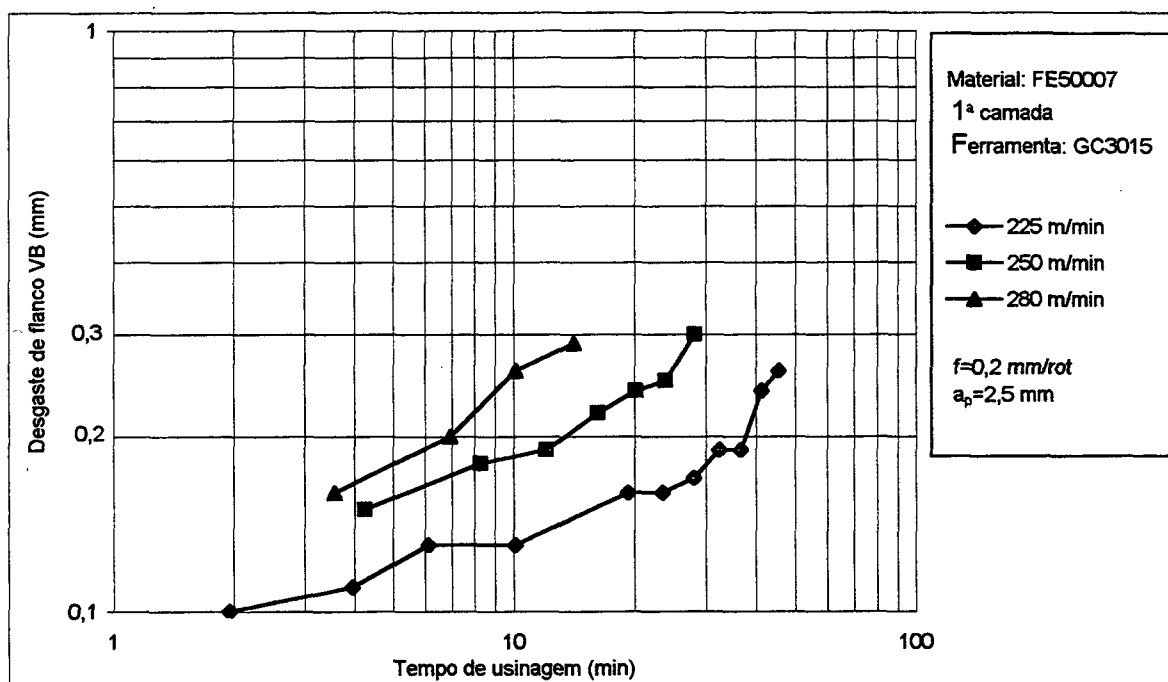


Figura 7.2 – Desgaste da ferramenta GC3015 na usinagem do corpo-de-prova na 1ª camada

Observou-se, ainda, que para VB maior que 0,2 mm existiu uma intensificação do desgaste, fato que está associado a uma progressiva perda do revestimento das ferramentas, proporcionando uma maior solicitação térmica junto ao substrato. As figs. 7.3 e 7.4 ilustram o desgaste na face e no flanco dessa pastilha, na velocidade de 280 m/min. A perda do revestimento da pastilha junto à região ativa se deve ao fato de que estes revestimentos tem uma espessura muito pequena, da ordem de alguns

micrômetros, e que o desgaste de flanco atinge valores da ordem de 0,2 mm, dessa forma, expondo o substrato da pastilha às condições de desgaste.

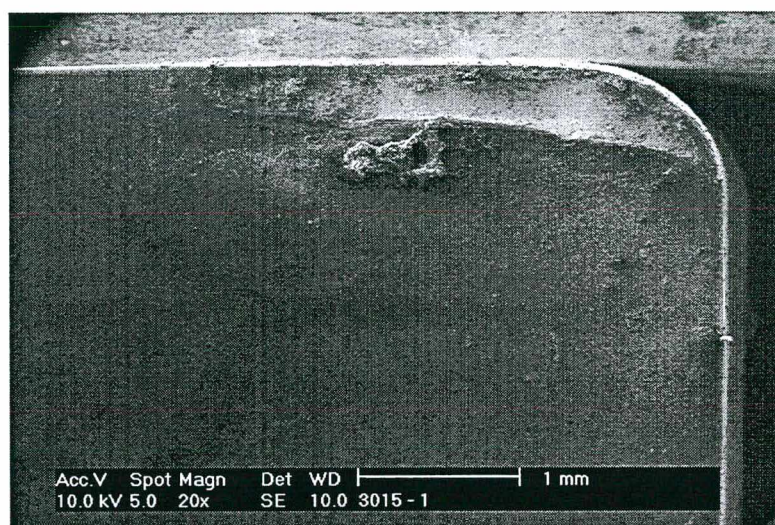


Figura 7.3 – Vista da face da pastilha GC3015, 1ª camada, 280 m/min (aumento 20x).

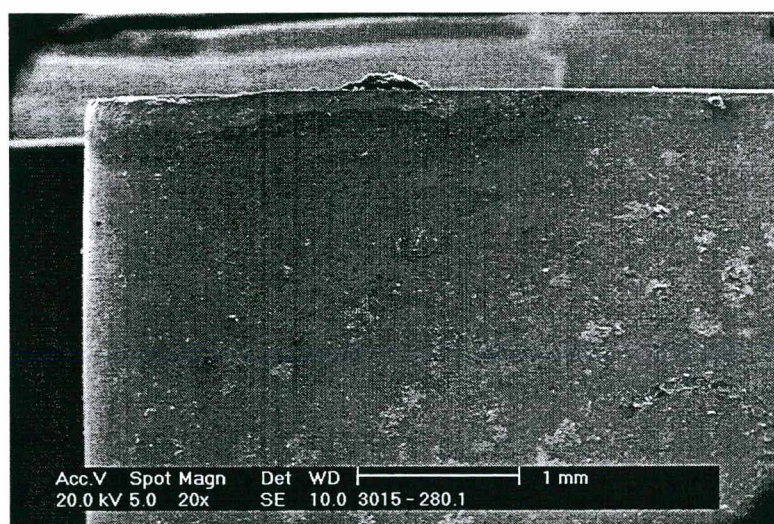


Figura 7.4 – Vista do flanco da pastilha GC3015, 1ª camada, 280 m/min (aumento 20x)

Na 2ª camada, conforme ilustra a figura 7.5, observou-se a superposição das curvas que representam o comportamento do desgaste das ferramentas empregadas nas velocidades de 225 e 250 m/min, isto para um VB de até 0,2 mm. Por sua vez,



para a velocidade de 280 m/min ocorreu um aumento significativo do desgaste da ferramenta, resultando em um tempo de usinagem de 17 min para um VB de 0,3 mm, contra 40 e 33 min, respectivamente, para as velocidades mais baixas referidas anteriormente. Salienta-se que a segunda camada contém até 3% de cementita, 3 a 10% de perlita e (389 a 322 nódulos de grafita)/mm<sup>2</sup>. Apresenta-se, portanto, como composição intermediária, perdendo cementita, e ocorrendo a diminuição da quantidade de nódulos de grafita, porém, adquirindo até 10% de perlita. Esta última, conforme visto na literatura [28], proporciona uma considerável influência no sentido de aumentar o desgaste das ferramentas, acentuando-se com a elevação da velocidade de corte. Logo, os resultados obtidos estão associados à velocidade de corte e à complexidade dos microconstituintes do material, notando-se apenas um pequeno efeito final para as velocidades menores, para VB acima de 0,2 mm e um efeito pronunciado para a velocidade de 280 m/min. Como no caso da 1ª camada, o efeito da perda progressiva do revestimento das ferramentas sobre o desgaste destas também foi observado nessa 2ª camada. As figs. 7.6 e 7.7, respectivamente, ilustram o desgaste na face e no flanco dessa pastilha, na velocidade de 250 m/min.

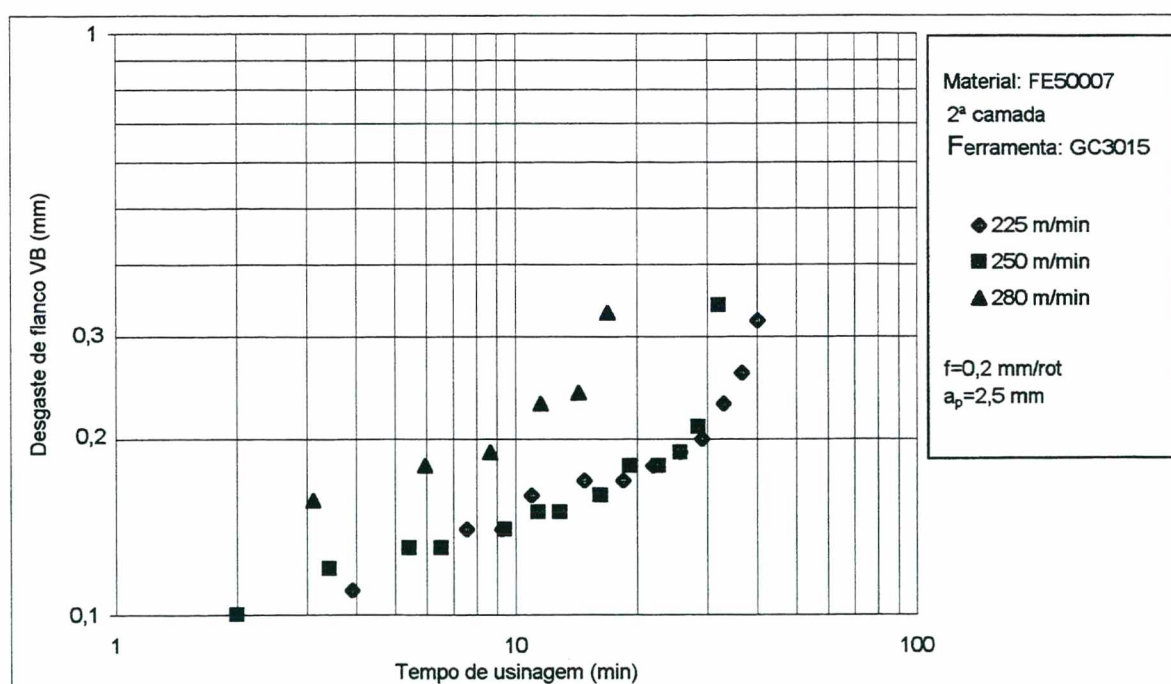


Figura 7.5 – Desgaste da ferramenta GC3015 na usinagem da 2ª camada do corpo-de-prova.

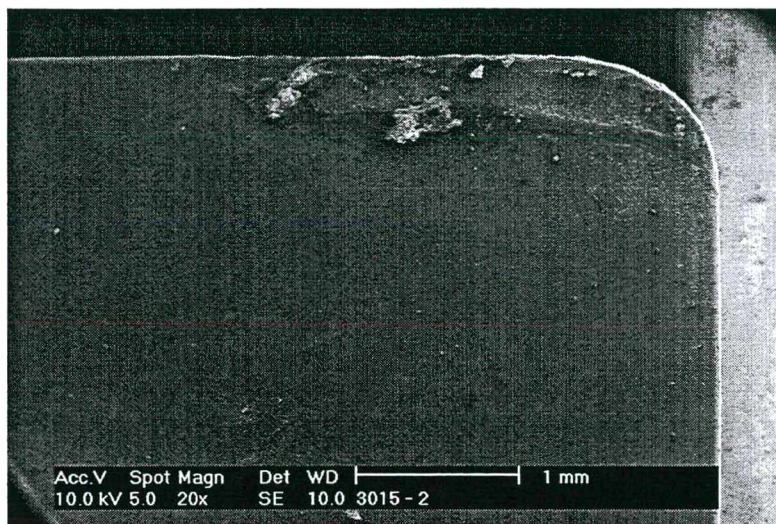


Figura 7.6 – Vista da face da pastilha GC3015, 2ª camada, 250 m/min (aumento 20x)

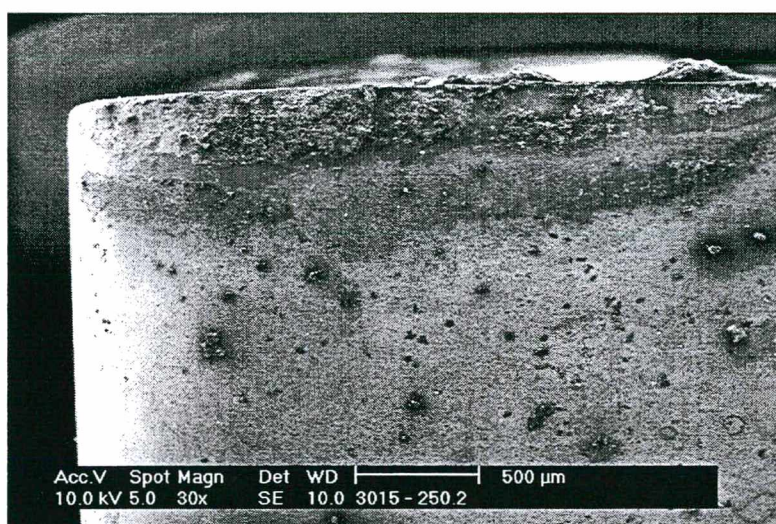


Figura 7.7 – Vista do flanco da pastilha GC3015, 2ª camada, 250 m/min (aumento 30x)

Na 3ª camada, conforme ilustra a figura 7.8, de fato ocorreu apenas uma tendência da velocidade de corte influenciar sobre o desgaste de flanco das ferramentas, isto para VB de até 0,2 mm. Acima deste citado valor, a influência é imediatamente nítida para as velocidades mais altas, ou seja, 250 e 280 m/min e retardada para a velocidade mais baixa, 225 m/min. Para o mencionado valor de VB



obteve-se 20, 17 e 12 min de usinagem para as velocidades de 225, 250 e 280 m/min, respectivamente. No entanto, um efeito sensivelmente maior foi constatado a partir do desgaste de flanco de 0,2 mm, resultando em 36, 21 e 14 minutos de usinagem para VB de 0,3 mm, nas respectivas velocidades citadas anteriormente. Este resultado atribui-se, principalmente, ao efeito da perlita que se encontra na microestrutura do material nessa terceira camada, na faixa de 10 a 25%. Pelo que se verifica na figura 7.8, essa perlita causa um efeito mais acentuado na medida em que a ferramenta perde progressivamente seu revestimento, tornando-se mais vulnerável a ação da abrasão causada pela perlita sobre o desgaste de flanco. Salienta-se, ainda, que a terceira camada é relativamente pobre em nódulos de grafita, 212 a 135 nódulos/mm<sup>2</sup>, fato que reduz o efeito lubrificante sobre a ferramenta, tornando-a mais suscetível ao desgaste. As figuras 7.9 e 7.10 ilustram, respectivamente, o desgaste na face e no flanco dessa pastilha, na velocidade de 225 m/min.

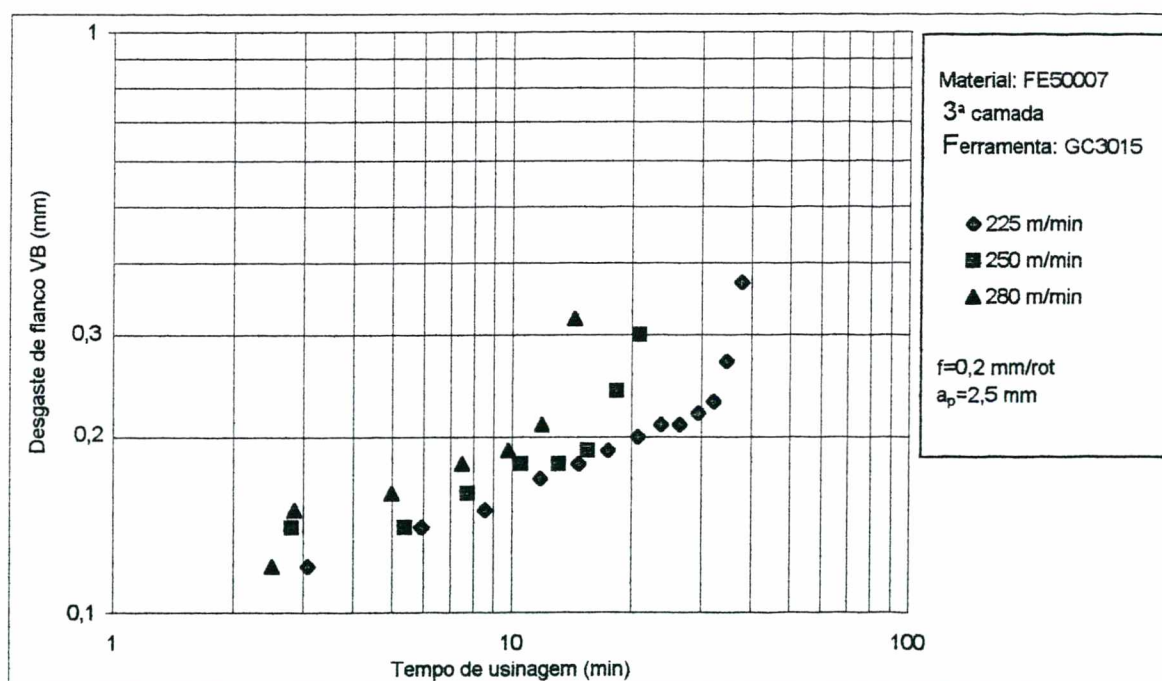


Figura 7.8 – Desgaste da ferramenta GC3015 na usinagem da 3ª camada do corpo de prova

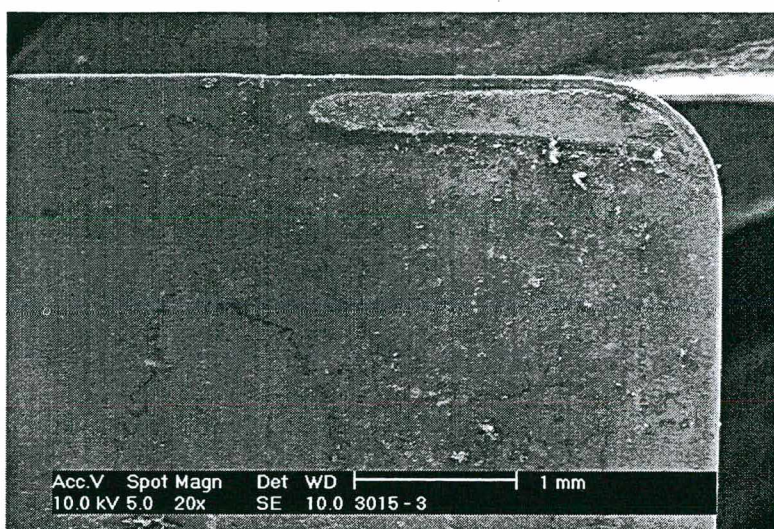


Figura 7.9 – Vista da face da pastilha GC3015, 3ª camada, 225 m/min (aumento 20x)

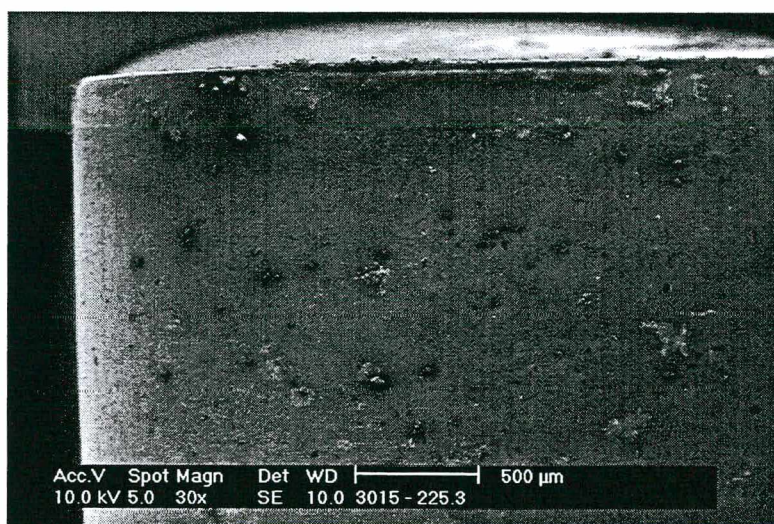


Figura 7.10 – Vista do flanco da pastilha GC3015, 3ª camada, 225 m/min (aumento 30x)

A partir da discussão anterior e da tabela 7.2, pode-se trazer as seguintes conclusões gerais:



Tabela 7.2 – Tempos finais de usinagem para as três camadas e três velocidades de corte, para uma marca de desgaste VB de 0,3 mm

V <sub>c</sub> (m/min)	tempo de usinagem (min)		
	1ª camada	2ª camada	3ª camada
225	48	38	35
250	28	31	21
280	13	16	14

Dado a larga faixa de variação dos componentes microestruturais do material nas três camadas dos corpos de prova, cementita de 10 a 0%, perlita de 3 a 25% e 425 a 135 nódulos de grafita por mm<sup>2</sup>, e que reconhecidamente esta faixa de variação tem uma influência marcante sobre o desgaste das ferramentas, torna-se bastante complexo um estudo mais profundo sobre o efeito específico da velocidade de corte em cada camada.

Mesmo na presença desta heterogeneidade do material, para as três camadas, os resultados quanto ao efeito do aumento da velocidade de corte sobre o desgaste das ferramentas mostrou-se tendencialmente correto, ou seja, na medida em que aumenta a velocidade de corte aumenta, também, o desgaste da ferramenta. Este resultado encontra-se dentro do esperado e é compatível com a literatura especializada na área de usinagem.

A partir de um desgaste de flanco de 0,2 mm existe uma intensificação do desgaste das ferramentas decorrente da progressiva perda de revestimento, tornando-as mais vulneráveis ao desgaste, principalmente nas velocidades mais elevadas.

### **7.1.2 – Influência da microestrutura de cada camada do material sobre o desgaste das ferramentas**

Numa segunda etapa do trabalho pesquisou-se a relação existente entre a microestrutura ao longo das três camadas dos corpos de prova e o desgaste de flanco das ferramentas. As figuras. 7.11, e 7.12 ilustram os resultados obtidos, cuja análise é a seguir relatada.

Para a menor velocidade de corte utilizada, 225 m/min, não se constatou a influência da heterogeneidade do material, ao longo das camadas 1,2 e 3, sobre o desgaste de flanco das ferramentas, conforme ilustra a figura 7.11. Ou seja, para um desgaste de flanco VB de até 0,2 mm a variação do desgaste encontrou-se dentro de uma faixa muito pequena, a qual, numa primeira interpretação, pode ser considerada e aceita como uma dispersão normal e atribuída à própria impossibilidade da obtenção de uma absoluta homogeneidade do material dos corpos de prova, das ferramentas e da condução dos experimentos.

Este resultado permitiu pressupor que a heterogeneidade presente no material não foi suficientemente sensível a ponto de produzir um efeito notável sobre o desgaste das ferramentas.

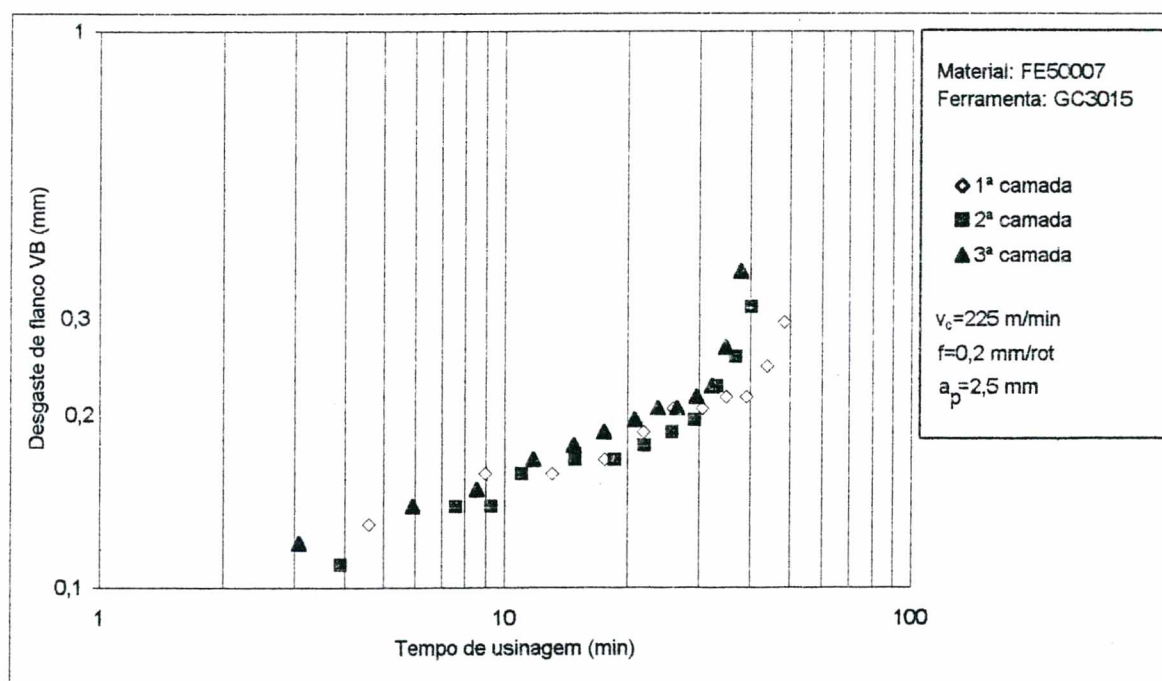


Figura 7.11 – Influência das camadas (microestrutura) do ferro fundido nodular FE-50007 sobre o desgaste da ferramenta GC3015 na velocidade de 225 m/min

Na velocidade de 250 m/min constatou-se que a segunda camada proporcionou um menor desgaste da ferramenta. Por sua vez, a partir de um VB da ordem de 0,23 mm existiu uma inversão dos resultados entre a primeira e a terceira camada, notando-



se também que, a partir de um VB da ordem de 0,2 mm, o efeito da terceira camada sobre o desgaste da ferramenta já foi mais intenso do que aquele proporcionado pela primeira camada, conforme ilustra a figura 7.12. Isto nos leva a considerar que, para velocidades maiores e já havendo uma perda parcial do revestimento da ferramenta, esta tornou-se mais sensível ao desgaste devido à presença de um maior percentual de perlita e menor densidade de nódulos de grafita presentes na terceira camada dos corpos de prova.

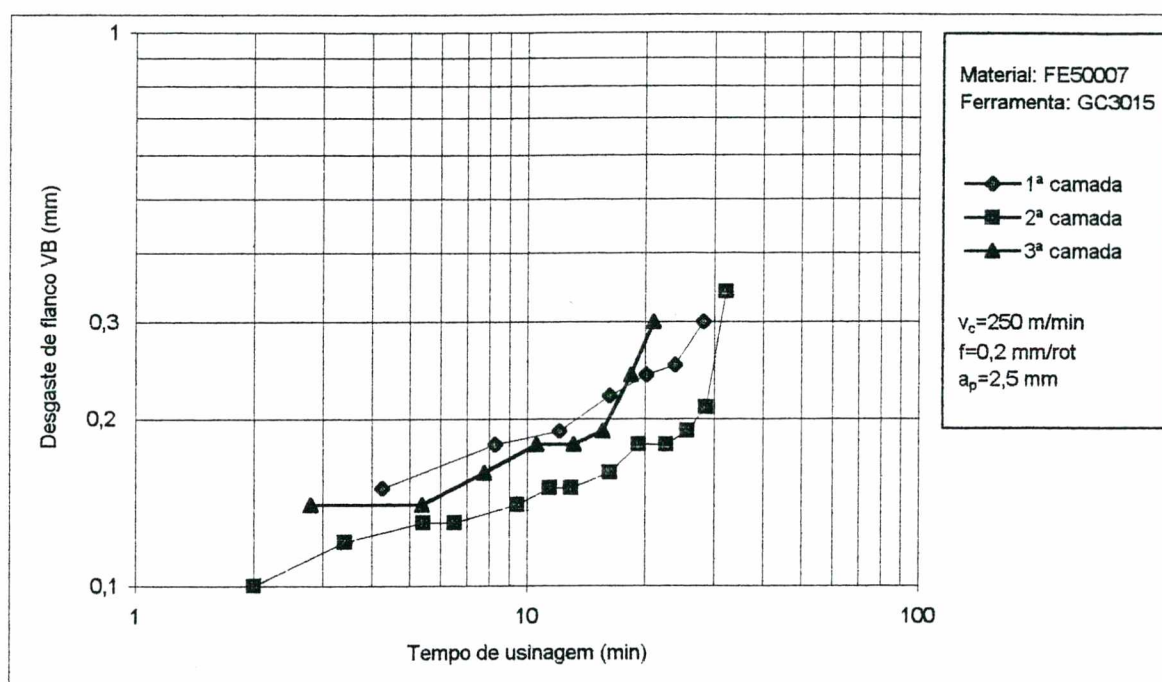


Figura 7.12 – Curvas de desgaste de flanco x tempo de usinagem da ferramenta GC3015, na usinagem das três camadas do ferro fundido FE-50007, na velocidade de 250 m/min

Por sua vez, para a maior velocidade de corte empregada nos ensaios de usinagem deste trabalho, 280 m/min, o resultado foi de certo modo semelhante ao obtido na velocidade de 225 m/min, conforme ilustra a figura 7.13. No entanto, nesta maior velocidade, o desgaste da ferramenta foi mais intenso, porém a faixa de variação dos resultados, para VB de 0,3 mm, mostrou-se inferior. Para um mesmo valor de desgaste, o tempo de usinagem para a velocidade de 280 m/min foi consideravelmente menor, conforme ilustra a tabela 7.2. Este resultado nos leva a considerações análogas às realizadas para a velocidade mais baixa, ou seja:

- a) Falta de sensibilidade do desgaste de flanco da ferramenta à variação da microestrutura dos corpos de prova;
- b) Existe um efeito compensatório ocasionado por determinados microconstituintes, proporcionando um resultado final imperceptível sobre o desgaste da ferramenta.

Como já salientado anteriormente, constatou-se, novamente, que a partir de um VB de 0,2 mm existiu uma intensificação do desgaste de flanco das ferramentas atingindo um valor de 0,3 mm em apenas 15 minutos de usinagem, contra 10 minutos para o valor anterior de VB.

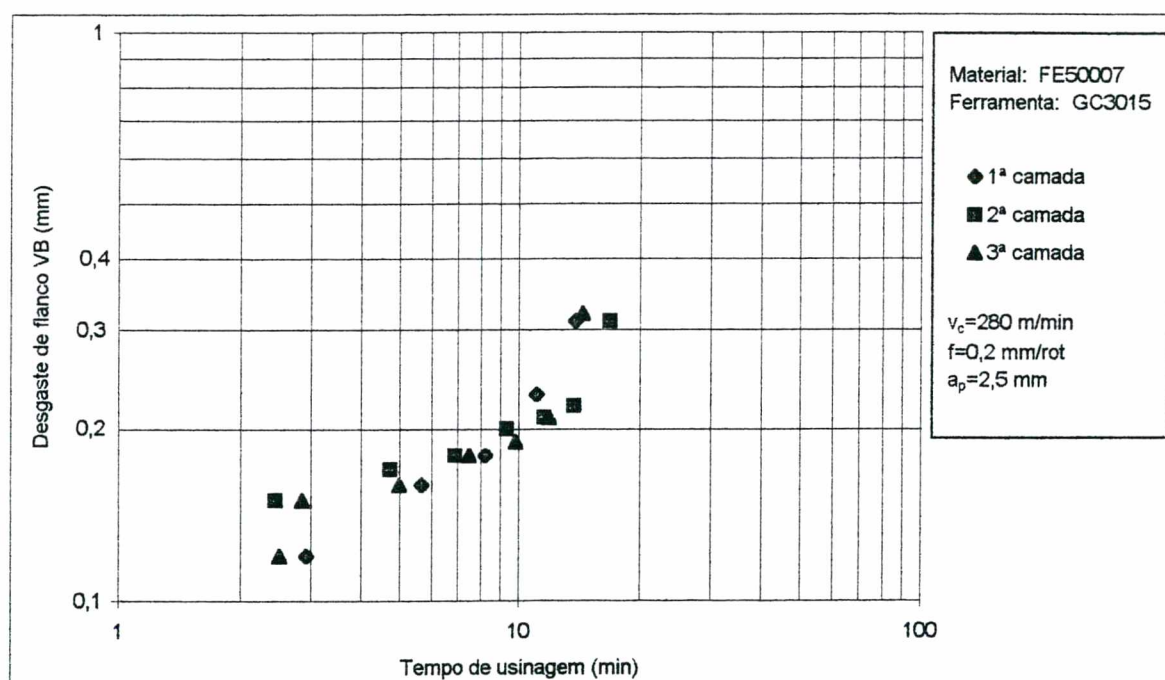


Figura 7.13 – Curvas de desgaste x tempo de usinagem da ferramenta GC3015, na usinagem das três camadas do ferro fundido FE-50007, na velocidade de 280 m/min

### 7.1.3 - Curvas de vida para diferentes critérios de desgaste e para as três camadas do Ferro Fundido FE-50007

Com base nos resultados apresentados e discutidos nos itens 7.1.1 e 7.1.2 foi possível compor a tabela 7.3, a qual apresenta o resumo dos valores dos tempos de

usinagem para as três velocidades de corte, em dois níveis de desgaste de flanco VB, para as três camadas do corpo de prova. A partir dos resultados contidos nessa tabela obteve-se as curvas de vida para as ferramentas GC3015, as quais estão ilustradas nas figuras. 7.14 e 7.15.

Tabela 7.3 – Valores finais dos tempos de usinagem (em minutos), para as diversas camadas do corpo de prova, nas diferentes velocidades de corte.

Velocidade de corte (m/min)	Tempo de usinagem t (min)					
	VB = 0,2 mm			VB= 0,3 mm		
	CAMADAS			CAMADAS		
	1ª	2ª	3ª	1ª	2ª	3ª
225	31	29	21	48	38	35
250	13	27	17	28	31	21
280	9	9	10	13	16	14

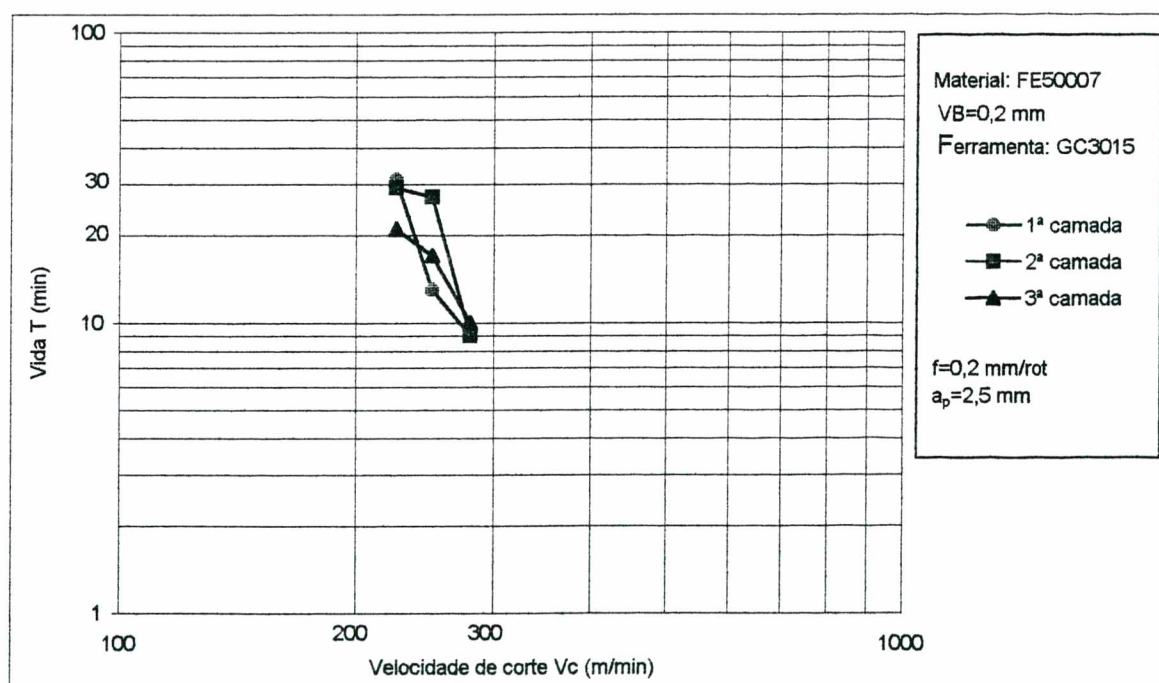


Figura 7.14 – Curvas de vida para as três camadas do ferro fundido nodular e para três velocidades de corte, VB de 0,2 mm



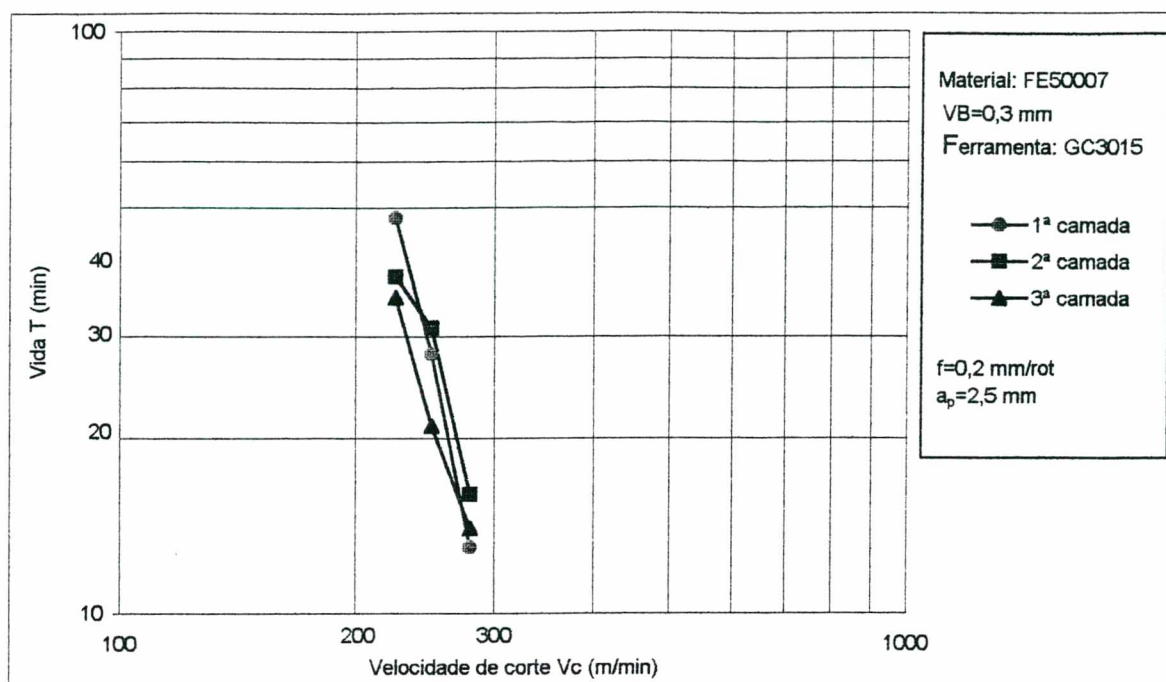


Figura 7.15 – Curvas de vida para as três camadas do ferro fundido nodular para as três velocidades de corte, VB de 0,3 mm

Comparando e analisando os resultados apresentados nas figuras. 7.14 e 7.15 verificou-se que estes apresentaram uma dispersão maior quando se utilizou VB de 0,2 mm como critério de fim de vida para a ferramenta. Observou-se, também, que o efeito da heterogeneidade da microestrutura do ferro fundido foi maior para as menores velocidades de corte, podendo, nesse caso, proporcionar uma diferença de até 27% entre a primeira e terceira camada para a velocidade de 225 m/min. Para a velocidade de 280 m/min essa diferença foi de apenas 19%, figura 7.15. Esta variação pode causar sérios problemas na produção industrial devido à dificuldade que acarreta, em termos de controle do desgaste e tempo adequado, para substituir da ferramenta.

Com base nos desgastes observados na ferramenta GC 3015 revestida, pode-se propor um VB de até 0,3 mm como critério de fim de vida, pois acima de 0,2 mm esse desgaste aumenta rapidamente, colocando a ferramenta numa zona de grande risco para um rápido colapso para desgastes maiores que 0,3 mm principalmente quando da utilização de elevadas velocidades de corte que exigem grande resistência térmica das ferramentas.

Os resultados descritos sugerem que a heterogeneidade do material, tendo em vista a variação da quantidade de nódulos de grafita, percentual de cementita, perlita e ferrita, devem ser alvo de um estudo específico e com maior profundidade, uma vez que, ao iniciar este trabalho, não se esperava encontrar um ferro fundido com características apresentadas no capítulo 6.

## 7.2- Usinagem do Ferro Fundido FE-50007 com Pastilhas GC4015UM e GC4025UM

A figura 7.16 mostra o desempenho das ferramentas GC4015 e GC4025, ambas com quebra-cavaco tipo UM [21], quanto ao tempo de usinagem e ao desgaste de flanco, usinando ferro fundido nodular FE-50007 na 2ª camada.

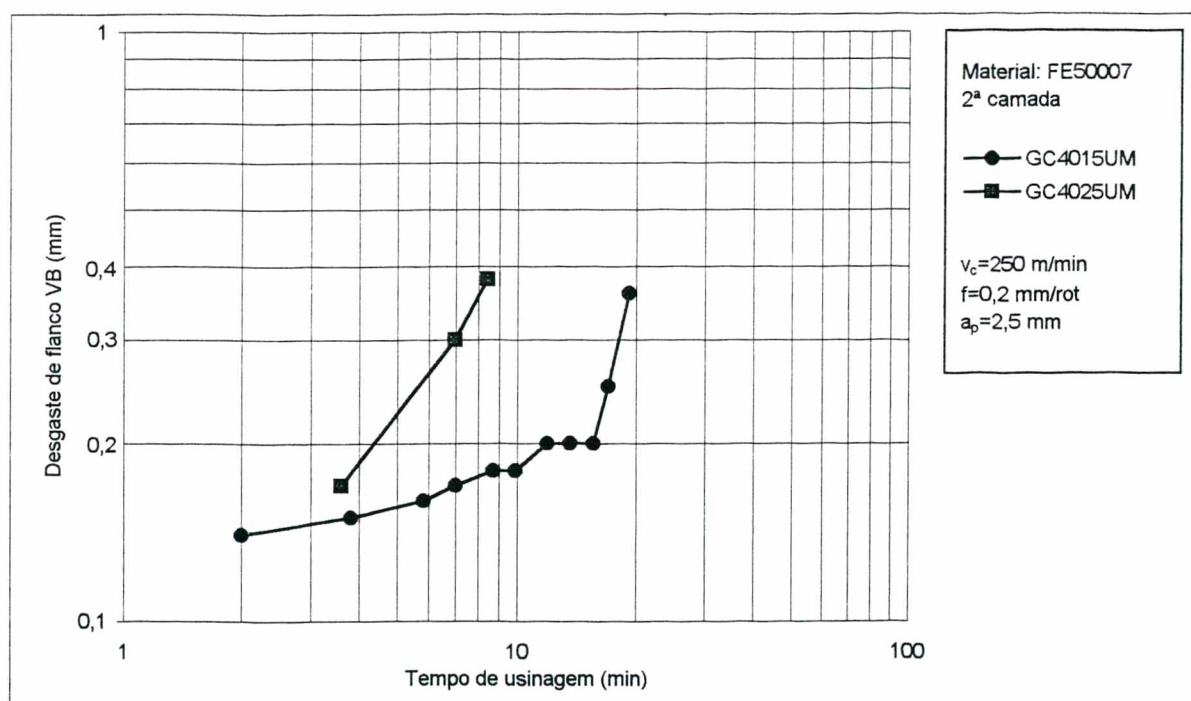


Figura 7.16 - Desgaste de flanco x tempo de usinagem para as pastilhas GC4015UM e GC4025UM.

A pastilha GC4015UM tem uma cobertura espessa e resistente ao desgaste sobre um substrato duro e termo-resistente, o qual possui revestimento de  $Al_2O_3$  com

uma espessura na ordem de 6  $\mu\text{m}$ . A camada externa é uma cobertura fina de TiN. A combinação substrato/cobertura proporciona à pastilha GC4015 excelentes propriedades de resistência ao desgaste para uma ampla gama de aplicações em aços, bem como em ferros fundidos [21]. Na prática, a referida ferramenta mostrou um desempenho inferior ao da GC3015, ou seja, ela atingiu um desgaste de 0,20 mm já aos 17 minutos de usinagem, contra 27 minutos para esta última, isto para o mesmo valor de VB, respectivamente, figura 7.16 e tabela 7.3. A partir do momento em que a ferramenta atinge um VB de 0,20 mm ocorre o rompimento do revestimento e o desgaste aumenta rapidamente no decorrer da usinagem, figura 7.16.

A pastilha GC4025UM tem uma camada espessa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sobre uma camada de Ti(C,N). A camada externa fina de TiN proporciona uma cor dourada (amarelada) e, de certo modo, facilita a identificação e medição do desgaste de flanco. No entanto, esta não é a função original e principal desta camada. A combinação de uma camada espessa (10  $\mu\text{m}$ ), resistente ao desgaste, com um substrato tenaz, enriquecido com cobalto, proporciona a esta classe uma excelente combinação de alta resistência ao desgaste e ao microlascamento do gume [21]. Entretanto, na prática, para a usinagem do ferro fundido nodular em questão, essa ferramenta mostrou-se menos resistente ao desgaste no flanco do que as ferramentas GC3015 e GC4015UM, atingindo um VB de 0,20 mm antes dos 5 minutos de usinagem, figura 7.16.

### **7.3- Usinagem do Ferro Fundido com Pastilhas de Cermet e Cerâmicas**

A pastilha de Cermet CT525, de composição à base de TiN [21], usinou o ferro fundido na primeira camada durante um tempo de 2 minutos na velocidade de 280 m/min, perdendo as condições de corte após ter ocorrido o severo lascamento da quina, desgaste abrasivo do gume e desgaste na superfície de saída, conforme ilustram as figuras 7.17 e 7.18, ocasionado uma brusca interrupção da usinagem.



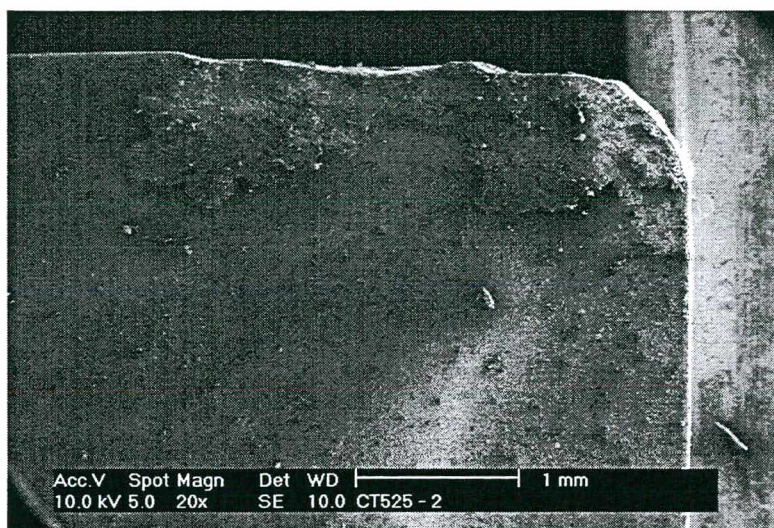


Figura 7.17 – Vista da face da pastilha de CERMET CT525, 280 m/min (aumento 20x)

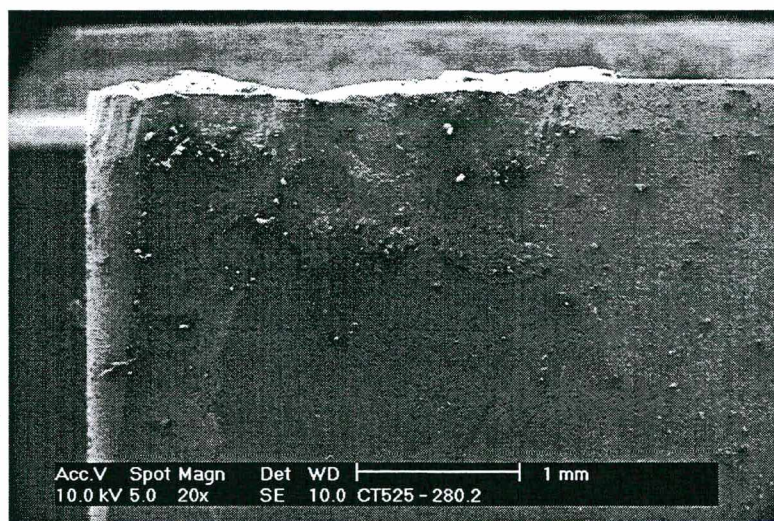


Figura 7.18 – Vista do flanco da pastilha de CERMET CT525, 280 m/min (aumento 20x)

Por sua vez, a pastilha de cerâmica CC690, de composição a base de nitrato de silício, usinou o ferro fundido, na primeira camada e velocidade de 250 m/min, durante um tempo de 4 minutos. Já nestes poucos minutos de usinagem ocorreu um pronunciado desgaste de flanco VB, atingindo 0,5 mm, o que impediu a continuidade do processo e denotou a sua incompatibilidade com o ferro fundido nodular FE-50007.



As figuras. 7.19 e 7.20, respectivamente, ilustram o desgaste na face e no flanco ocorridos em tais condições de usinagem.

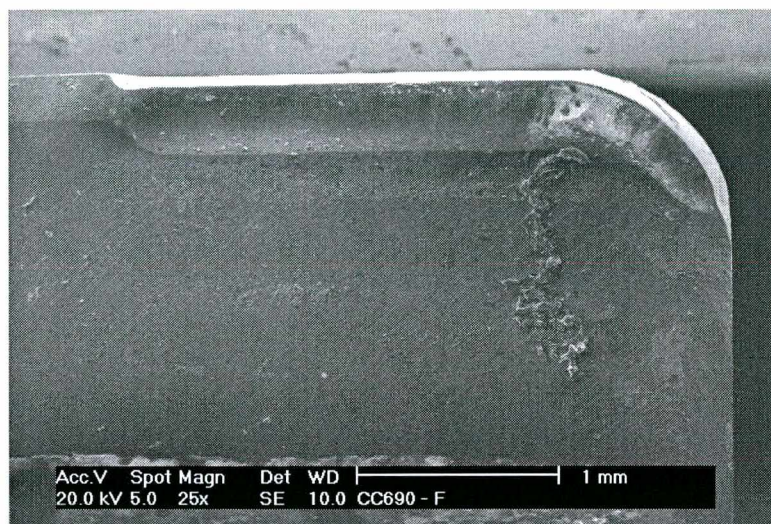


Figura 7.19 – Vista da face da pastilha de Cerâmica CC690, 250 m/min (aumento de 25x)

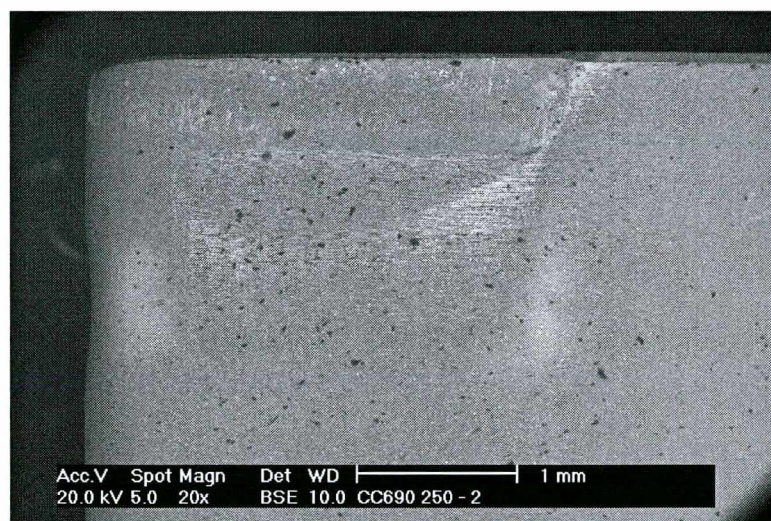


Figura 7.20 – Vista do flanco da pastilha de Cerâmica CC690, 250 m/min (aumento de 20x)

A pastilha de óxido de alumínio SN80 também foi utilizada na usinagem do ferro fundido, na primeira camada e velocidade de 250 m/min, durante um tempo de 14



minutos, atingindo uma desgaste de flanco VB de 0,47 mm. Tal desempenho, consideravelmente melhor do que o das ferramentas CT525 e CC690, é mostrado na figura 7.21.

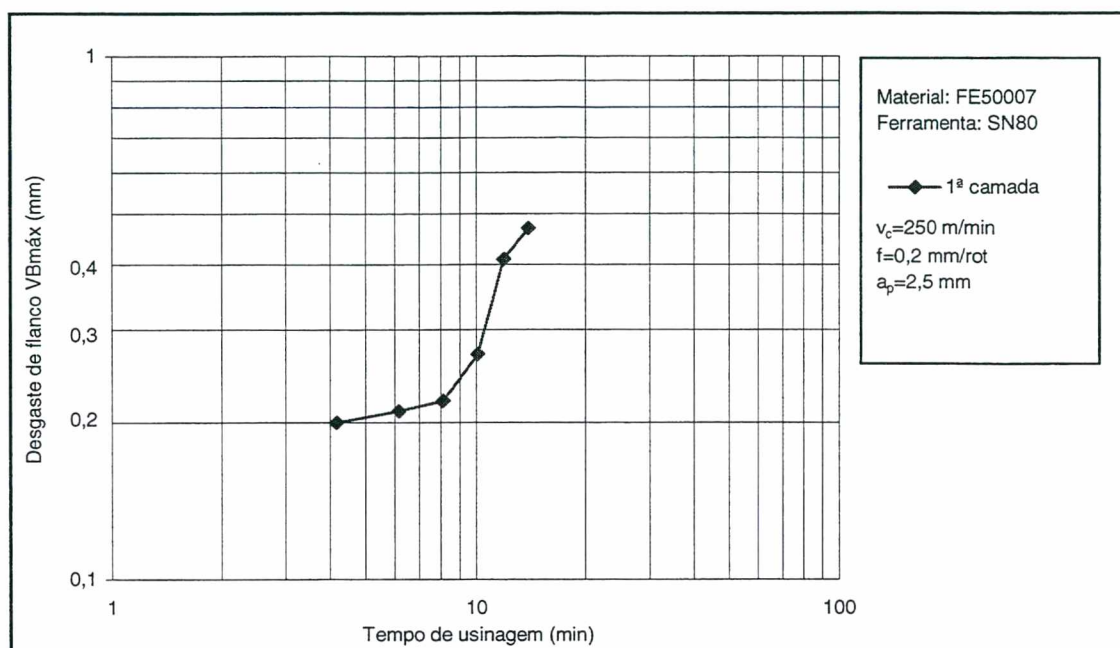


Figura 7.21 - Desgaste de flanco x tempo de usinagem para a pastilha de cerâmica SN80 usinando na 1ª camada

As figuras. 7.22 e 7.23, respectivamente, ilustram o desgaste na face e no flanco da pastilha cerâmica SN80.

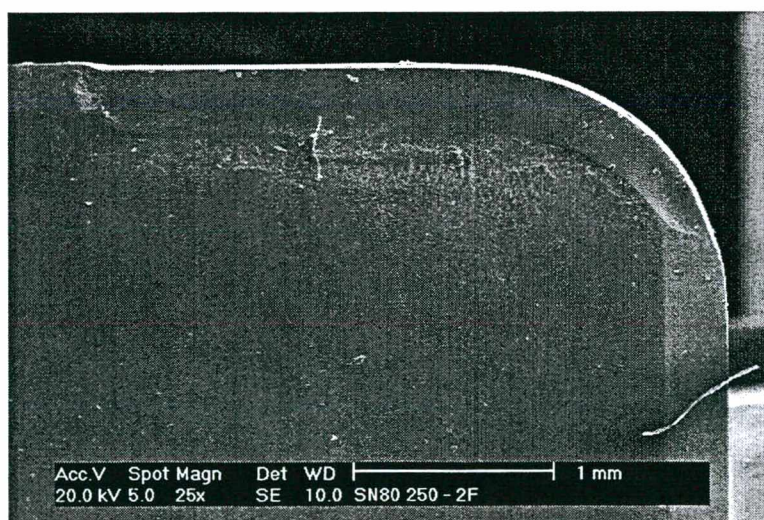


Figura 7.22 – Vista da face da pastilha de Cerâmica SN80, 250 m/min (aumento de 25x)

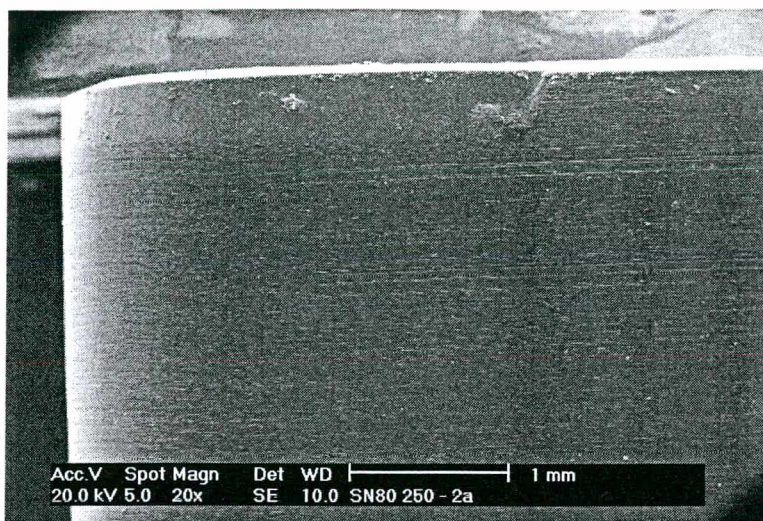


Figura 7.23 – Vista do flanco da pastilha de Cerâmica SN80 (aumento de 20x)

Outra pastilha de cerâmica utilizada na pesquisa foi a SL 100, à base de nitreto de silício, que usinou o ferro fundido nodular na 1ª camada, a uma velocidade de 250 m/min, durante um tempo de 2 minutos e atingiu um desgaste de flanco VB de 0,48 mm. Este desgaste de flanco foi exagerado para o tempo de usinagem em questão. Portanto, a pastilha SL 100 foi igualmente inadequada para a usinagem do ferro fundido nodular. As figuras. 7.24 e 7.25 ilustram o desgaste ocorrido na face e no flanco dessa ferramenta.

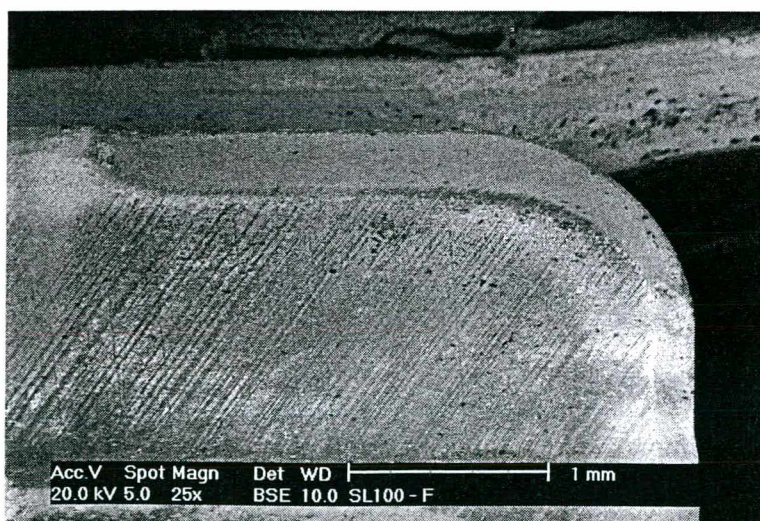


Figura 7.24 – Vista da face da pastilha de nitreto de silício SL 100 (aumento de 25x)



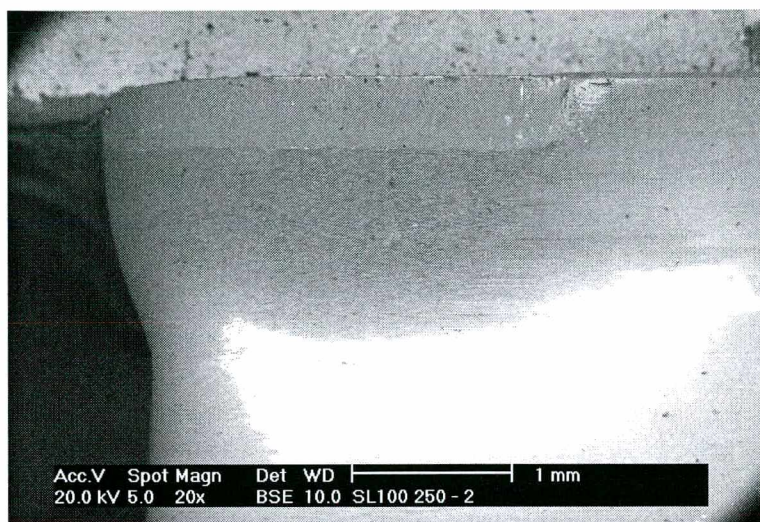


Figura 7.25 – Vista do gume da pastilha de nitreto de silício SL 100 (aumento de 20x)

#### **7.4 – Usinagem do Ferro Fundido FE-50007 – Comparação Entre os Resultados Obtidos com Ferramentas de Metal Duro e de Cerâmica**

A figura 7.26 apresenta uma síntese dos resultados obtidos em termos de desgaste de flanco para as diferentes classes de ferramentas tanto de metal duro quanto de cerâmica utilizadas na usinagem do ferro fundido FE – 50007.

Conforme já mencionado no início deste capítulo, os ensaios com o ferro fundido nodular FE-50007 concentraram-se na verificação do desempenho das pastilhas de metal duro revestido GC3015, classe ISO K20, por ser a mais recomendada pelo fabricante Sandvik-Coromant para a usinagem deste tipo de ferro fundido. A pastilha GC3015 possui uma camada externa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sobre uma camada de  $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ . A camada espessa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  proporciona uma grande resistência ao desgaste durante a usinagem do ferro fundido. Em todos os ensaios efetuados no ferro fundido, utilizando-se as pastilhas até alcançarem um desgaste de flanco de aproximadamente 0,3 mm, a GC3015 foi a que apresentou melhor desempenho, ou seja, um maior tempo de usinagem. Mesmo na velocidade de 280 m/min essa ferramenta usinou o ferro fundido na primeira camada durante um tempo de 14 min, alcançando um desgaste de flanco de VB de 0,31 mm.

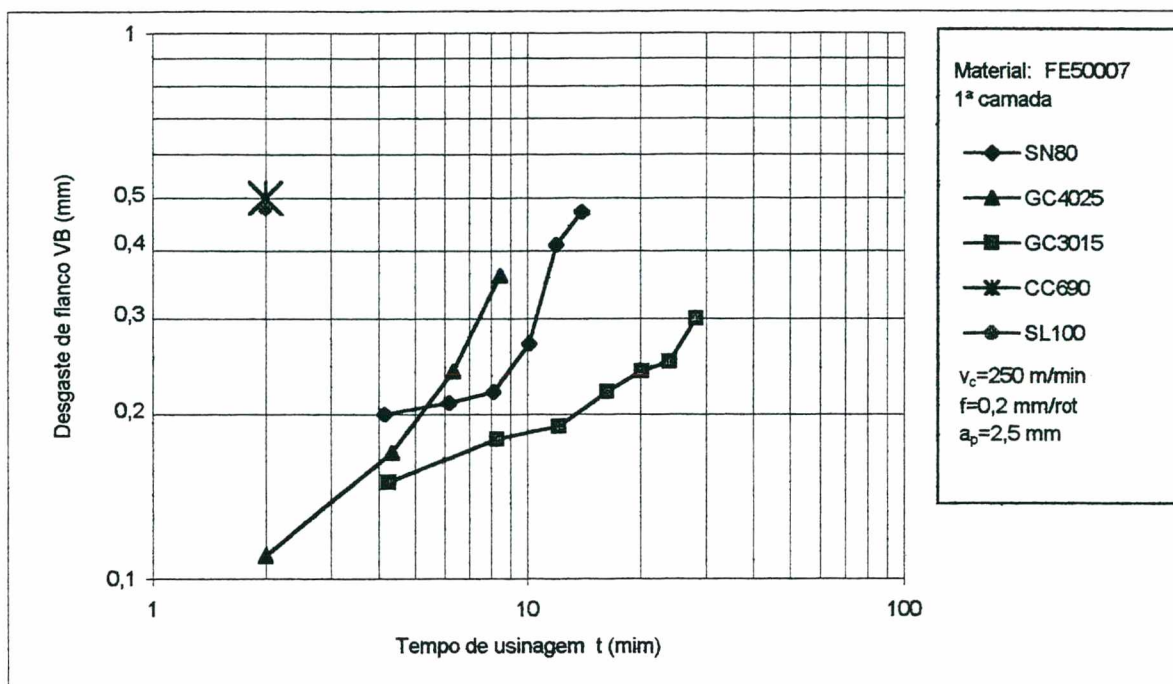


Figura 7.26 – Desgaste de flanco x tempo de usinagem para diversas classes de pastilhas

As pastilhas de cerâmica e Cermet não apresentaram um resultado satisfatório quando utilizadas na usinagem do ferro fundido nodular. Dentre as cerâmicas, a que apresentou melhor desempenho foi a pastilha de óxido de alumínio SN 80, apesar dos elevados níveis de desgaste. A cerâmica CC 690, de nitreto de silício, apresentou um grande desgaste de flanco VB de 0,5 mm em apenas 2 minutos de usinagem e a Cermet CT 525, à base de nitreto de titânio, apresentou nos minutos iniciais da usinagem, o lascamento da quina e um grande desgaste no flanco principal, o que impediu a continuidade do ensaio. A cerâmica à base de nitreto de silício SL100 teve um desempenho semelhante à CC 690, ou seja, nos dois minutos iniciais de usinagem já apresentava um desgaste de flanco de 0,48 mm. Vale lembrar que as duas ferramentas são produzidas por fabricantes distintos e já referidos anteriormente.

Este trabalho não teve como objetivo aprofundar a pesquisa sobre quais mecanismos estão envolvidos nesse acentuado desgaste das ferramentas cerâmicas, porém, considerando a importância do tema, recomenda-se uma maior exploração do mesmo. Essa constatação inicial quanto ao desgaste que ocorre nas mencionadas



ferramentas já se traduz em uma valiosa contribuição tanto para as pesquisas futuras quanto para as aplicações industriais.

### **7.5 - Usinagem do Aço ABNT 1045 com Ferramentas de Metal Duro GC4015UR e GC4025UM**

Tendo como propósito uma posterior comparação da usinabilidade do ferro fundido nodular FE-50007 com a do aço ABNT 1045, ambos com propriedades mecânicas equivalentes, procurou-se realizar um conjunto de experimentos com o mencionado aço, de modo que este objetivo pudesse ser alcançado ao menos parcialmente. Não é pretensão deste trabalho pesquisar exaustivamente a usinabilidade do aço ABNT 1045. Neste aço, os experimentos foram realizados com as pastilhas GC 4015UR e GC 4025UM. As mesmas classes de metal duro também foram utilizadas no ferro fundido e os resultados estão apresentados no início deste capítulo. Já os obtidos para o aço encontram-se ilustrados na figura 7.27. As duas pastilhas mostraram um bom desempenho no torneamento do aço ABNT 1045. O que se torna evidente nesta mesma figura é o fato da pastilha GC4025UM ter níveis de desgaste menores do que a pastilha GC4015UR, o qual está associado principalmente ao tipo de revestimento de ambas e que também foi apresentado no início do presente capítulo. Salienta-se que a primeira produziu cavacos em forma de vírgula e que a segunda produziu cavacos helicoidais. Os quebra-cavacos têm formas específicas e por este motivo os cavacos produzidos pelas ferramentas saíram em forma de vírgula e helicoidais. As figuras 7.28 e 7.29, respectivamente, ilustram o desgaste na face e no flanco da pastilha GC4015. As figuras 7.30 e 7.31, respectivamente, ilustram o desgaste na face e no flanco da pastilha GC4025.

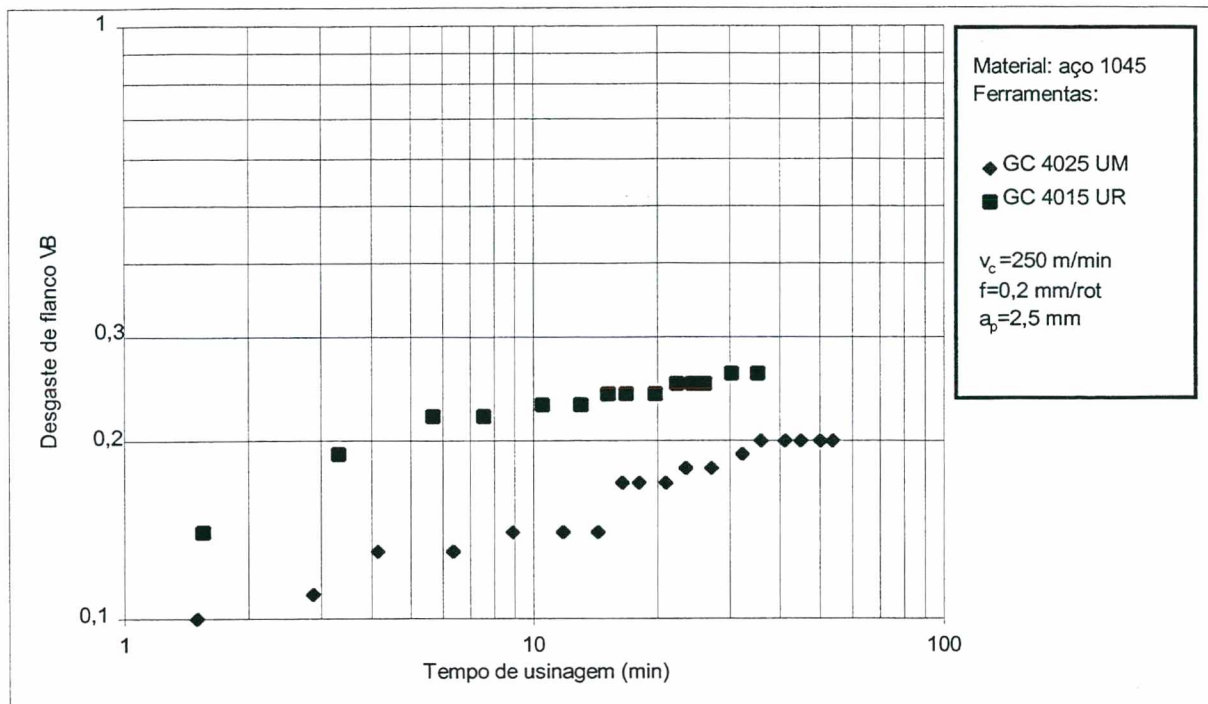


Figura 7.27 - Usinagem do aço ABNT 1045 com as pastilhas GC4025UM e GC4015UR

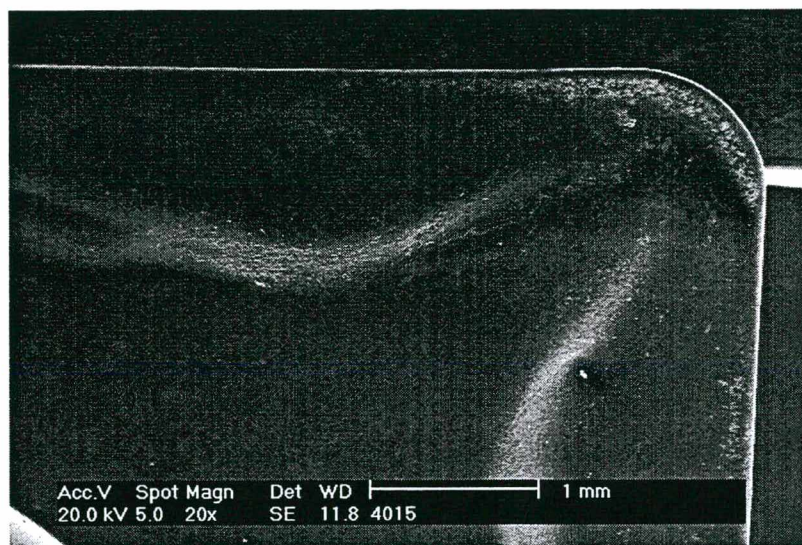


Figura 7.28 – Vista da face da pastilha de Metal Duro GC4015, 250 m/min (aumento de 20x)



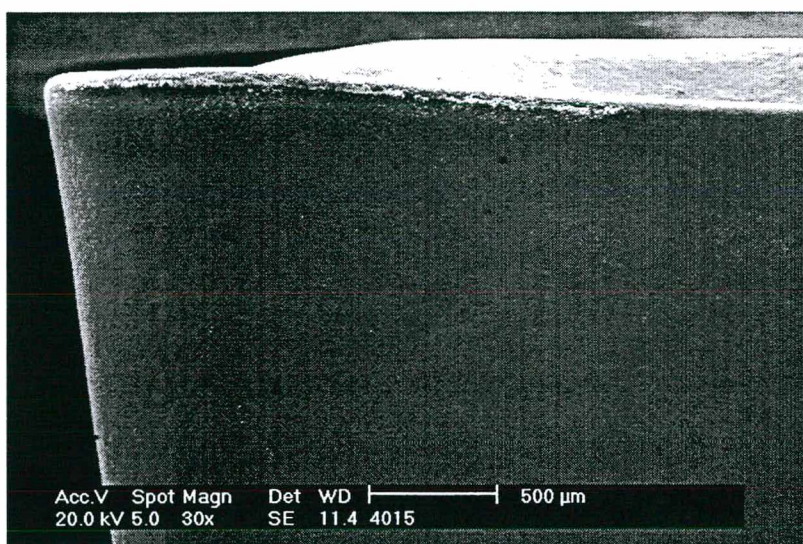


Figura 7.29 – Vista do flanco da pastilha de Metal Duro GC4015,250 m/min (aumento de 30x)

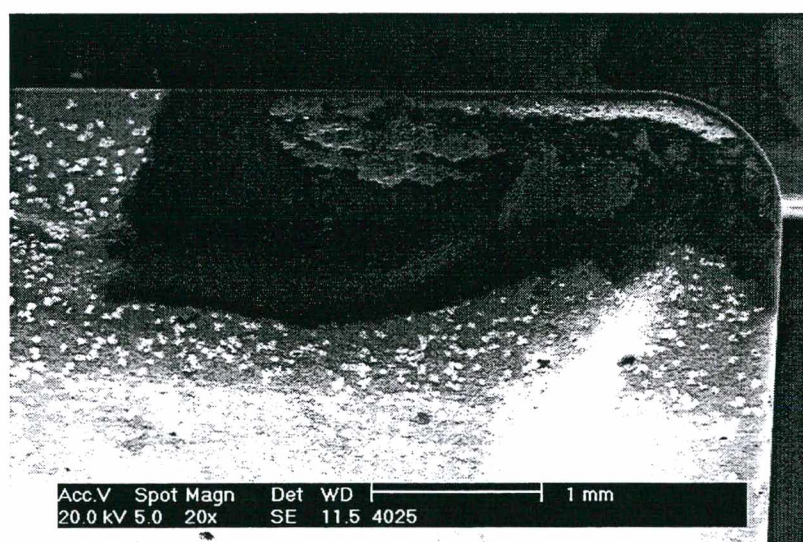


Figura 7.30 – Vista da face da pastilha de Metal Duro GC4025,250 m/min (aumento de 20x)

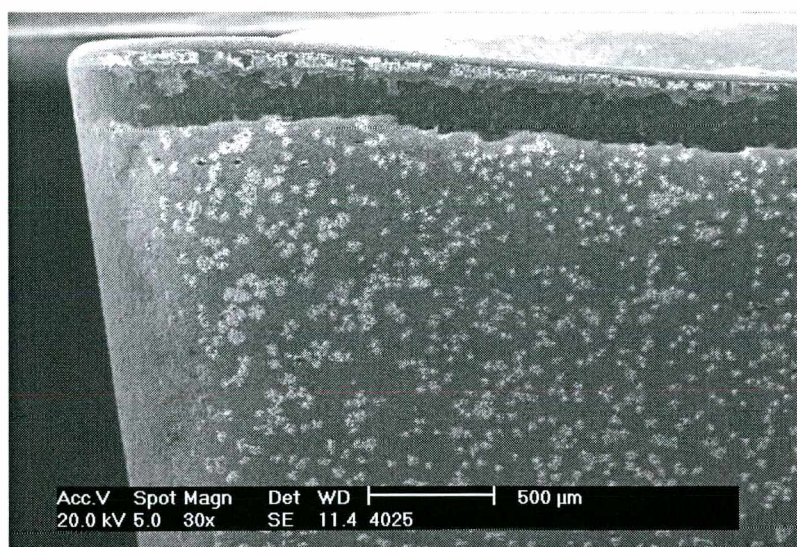


Figura 7.31 – Vista do flanco da pastilha de Metal Duro GC4025 (aumento de 30x)

## 7.6 - Análise da Dispersão dos Resultados Obtidos para o Ferro Fundido FE-50007

Nesta seção, será apresentado uma análise da dispersão dos resultados obtidos com os principais tipos de ferramentas utilizadas na usinagem do ferro fundido FE-50007, as quais são: GC3015; GC4025 e SN80. Esta última é de cerâmica à base de óxido de alumínio e as duas primeiras de metal duro com revestimento. Não faz parte dos objetivos deste trabalho esgotar este tema para as referidas ferramentas, mas ao menos confirmar a validade dos resultados e buscar mais subsídios para constatar a real necessidade de aprofundar as pesquisas e discussões em torno deste tema.

Nota-se que, conforme ilustra a figura 7.32, para a primeira camada do material usinado na velocidade de corte de 280 m/min, entre o experimento e sua réplica houve uma pequena dispersão dos valores de desgaste da ferramenta para um mesmo tempo de usinagem, tendendo a uma coincidência, em termos de valor de desgaste VB de 0,3 mm, para um tempo de usinagem de 15 minutos.

Considerando que a ferramenta GC 3015 era homogênea, do ponto de vista estrutural, e que os gumes ensaiados eram iguais, esta pequena dispersão nos valores



dos desgastes indicou que os ensaios foram bem conduzidos, confiáveis e que as microestruturas na primeira camada dos dois corpos de prova eram semelhantes.

Na figura 7.33, para a segunda camada do material, observou-se a coincidência do experimento com sua réplica. Pode-se afirmar que entre os dois corpos de prova ensaiados na segunda camada não ocorreu dispersão dos valores dos desgastes medidos, indicando que foram muito bem conduzidos e que praticamente não existia diferença microestrutural entre esse dois corpos de prova. Notou-se que quando a ferramenta perdeu o seu revestimento, em torno de um VB com 0,23 mm, esse mesmo desgaste VB aumentou rapidamente. Neste caso os ensaios foram realizados a 280 m/min e ambas as ferramentas trabalharam em torno de 17 minutos até atingir um desgaste de 0,32 mm.

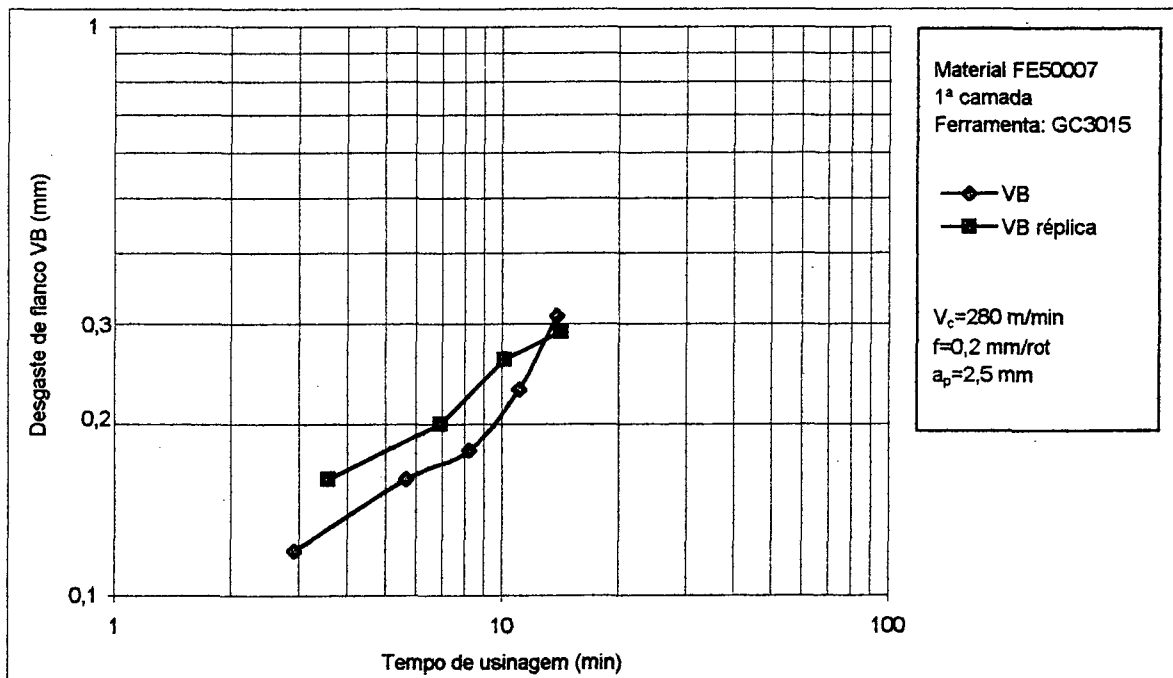


Figura 7.32 - Réplica do experimento na 1ª camada à velocidade de 280 m/min com a ferramenta GC3015

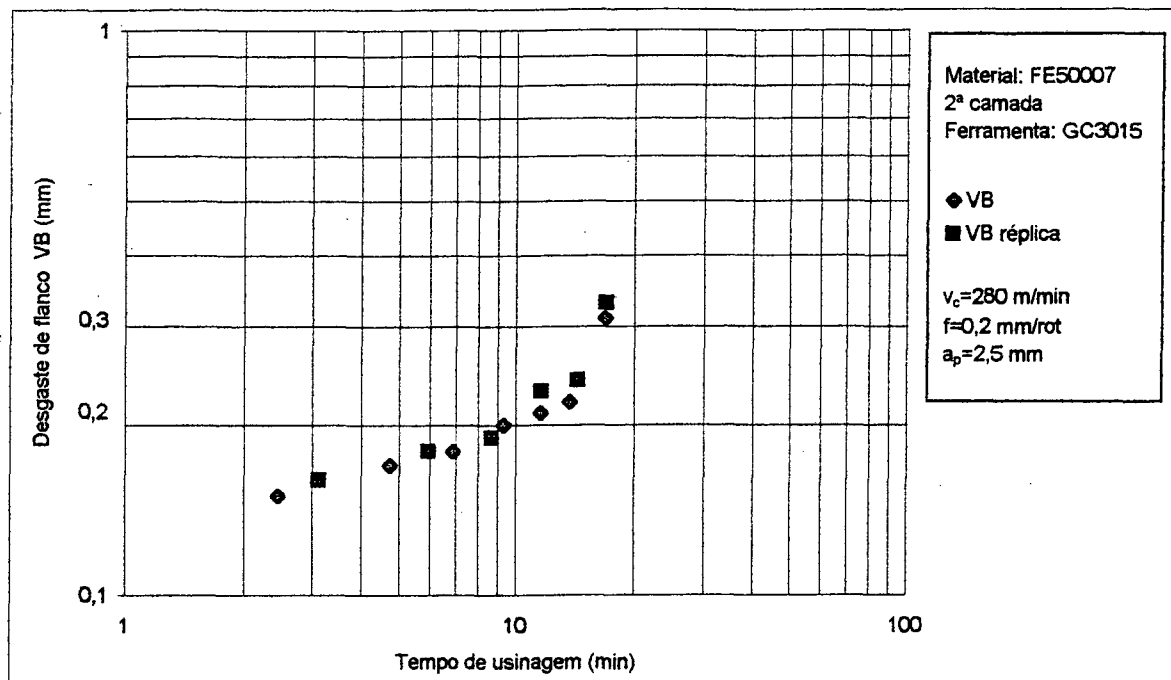


Figura 7.33 - Réplica do experimento na 2ª camada usando a ferramenta GC3015 e à velocidade de 280 m/min

Conforme ilustra a figura 7.34, observou-se que ocorreu uma pequena dispersão, para VB inferior a 0,23 mm, entre os valores de desgaste medidos para o experimento e sua réplica, ambos realizados a 225 m/min na segunda camada. Novamente, temos um indicativo da boa qualidade dos ensaios e da pequena diferença microestrutural entre os dois corpos de prova ensaiados. Acima de 0,23 mm ocorreu, como nos casos já descritos anteriormente, um aumento brusco do desgaste em ambas as ferramentas devido à falha de seus revestimentos, as quais alcançaram um desgaste VB de 0,30 mm aos 48 minutos de usinagem.

Na figura 7.35 observou-se a dispersão resultante entre o experimento e sua réplica quanto ao desgaste de flanco medido nos ensaios realizados a 250 m/min, na segunda camada. Embora com uma dispersão maior para um VB inferior a 0,20 mm, acima deste valor esta diferença mostrou-se menor e ocorreu o mesmo fenômeno, já descrito anteriormente, em relação ao revestimento dessas ferramentas. Dois fatores principais podem estar concorrendo para este fato, quais sejam, a heterogeneidade do material da peça ou eventuais e pequenos inconvenientes na parte experimental.

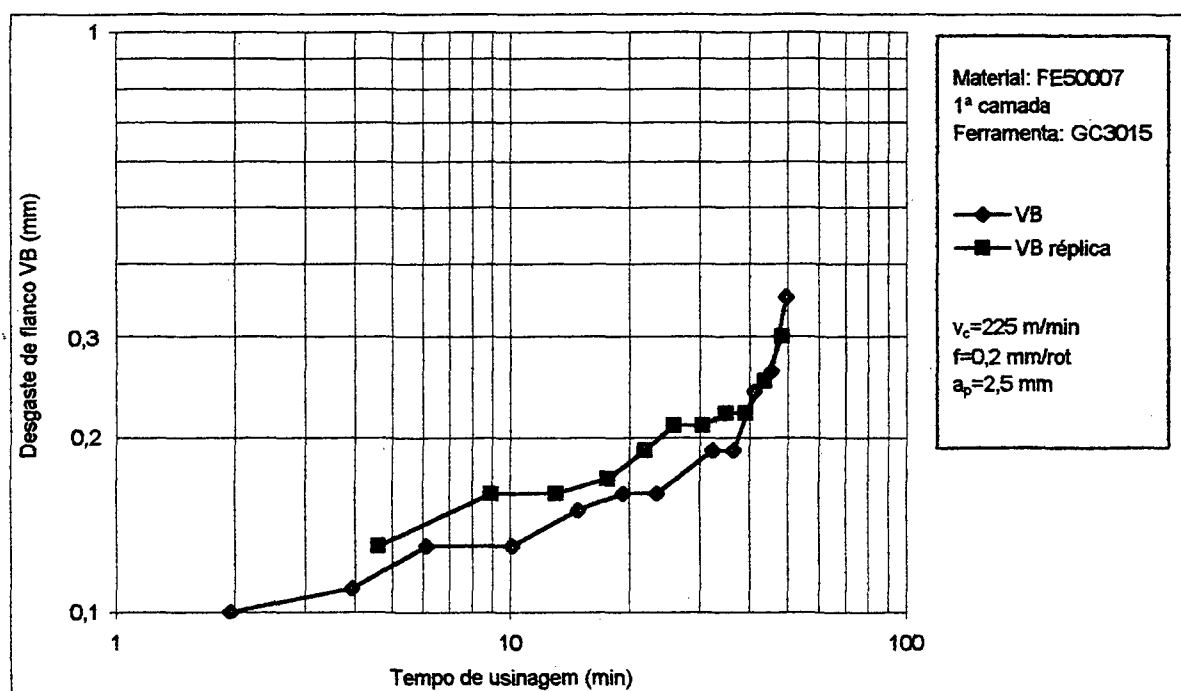


Figura 7.34 - Réplica do experimento na 1ª camada usando a ferramenta GC3015 à velocidade de 225 m/min

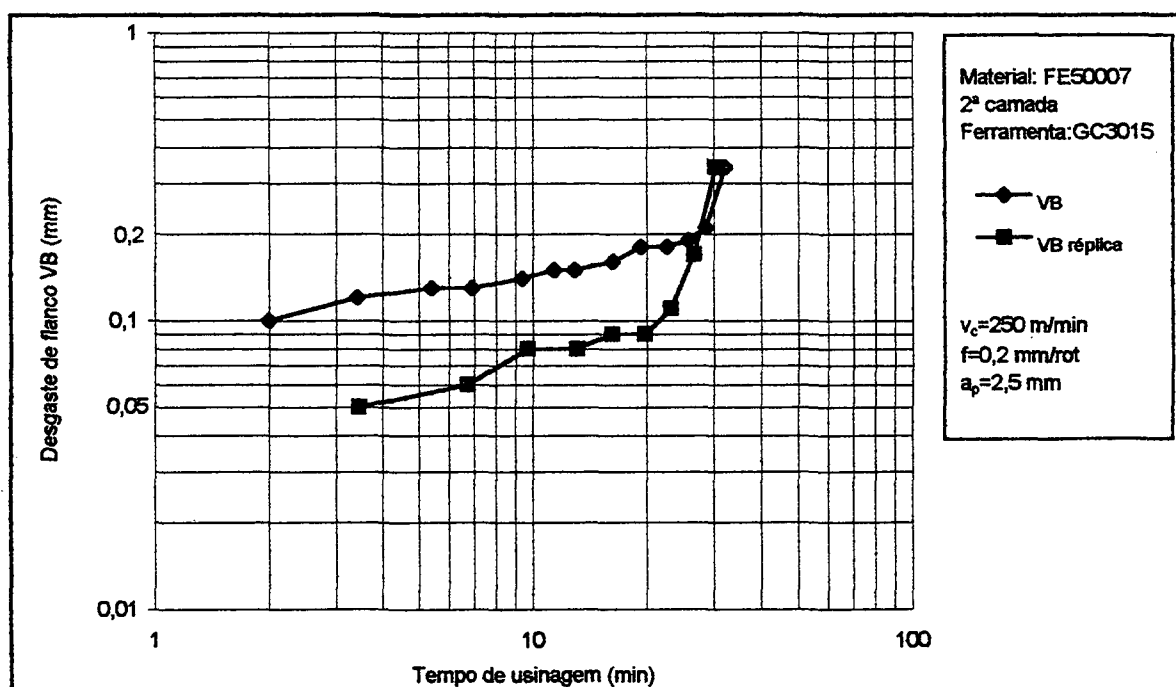


Figura 7.35 - Réplica do experimento na 2ª camada usando a ferramenta GC 3015 à velocidade de 250 m/min

Na figura 7.36 podemos observar que ocorreu uma dispersão inicial dos valores de desgaste e, posteriormente, houve uma aproximação das curvas com uma diminuição da diferença entre os valores de desgaste medidos, tanto para o experimento quanto para a sua réplica. Estes experimentos foram realizados na primeira camada do material, com pastilha GC 4025, a uma velocidade de 250 m/min. Para este tipo de experimento estes resultados podem ser considerados como esperados, ou seja, dentro de uma variação admissível. Pode-se dizer que os ensaios foram bem conduzidos e que a diferença microestrutural entre as amostras de material e de ferramentas foi pequena.

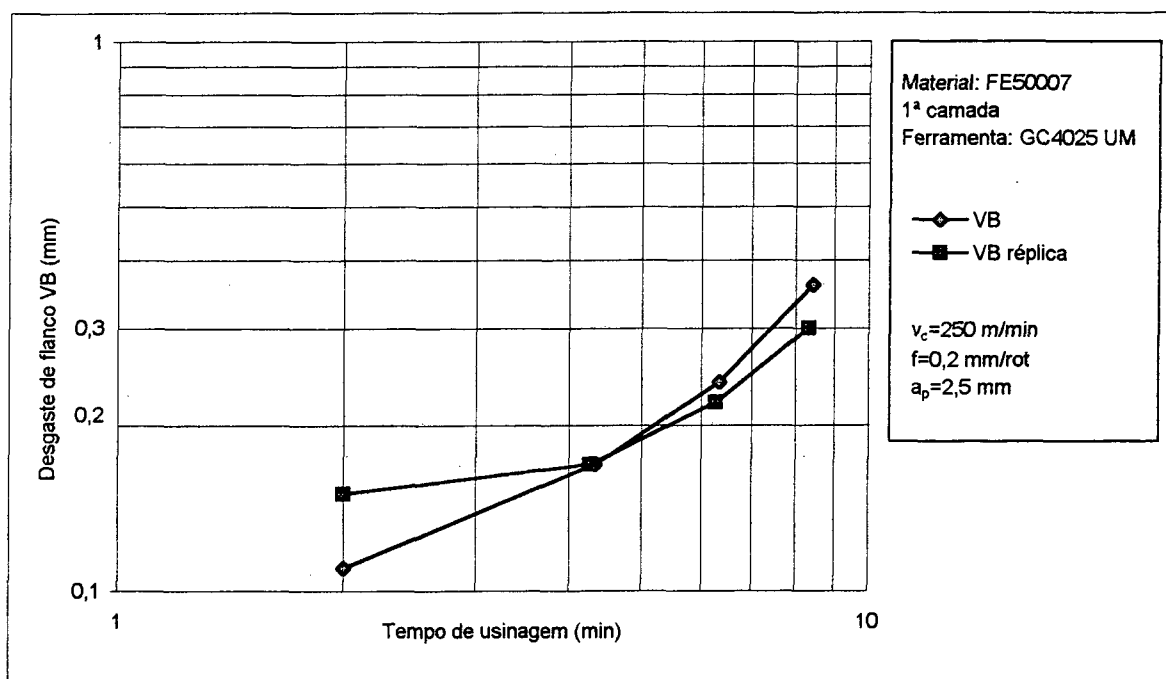


Figura 7.36 - Réplica do experimento na 1ª camada usando a ferramenta GC 4025UM e à velocidade de 250 m/min

Através da figura 7.37, a qual apresenta os resultados obtidos com as ferramentas cerâmicas SN 80 à base de óxido de alumínio usinando na primeira camada à 250 m/min, observou-se uma dispersão maior entre os valores dos desgastes medidos para o experimento e para a sua réplica, principalmente para desgastes VB inferiores a 0,40 mm. Baseando-se nos outros ensaios pode-se dizer que apesar do experimento ter sido bem conduzido, existe a possibilidade das microestruturas na primeira camada dos dois corpos de prova, assim como as próprias

ferramentas, serem as principais responsáveis por essas diferenças. Constatou-se, também, que as ferramentas SN 80 não são apropriadas, ou seja, não apresentaram vantagens sobre as GC 3015, uma vez que para a velocidade de 250 m/min e um tempo de usinagem na ordem de 15 minutos já apresentaram um desgaste próximo dos 0,50 mm. No entanto, esta constatação preliminar é passível de uma investigação mais profunda e que não faz parte dos objetivos deste trabalho.

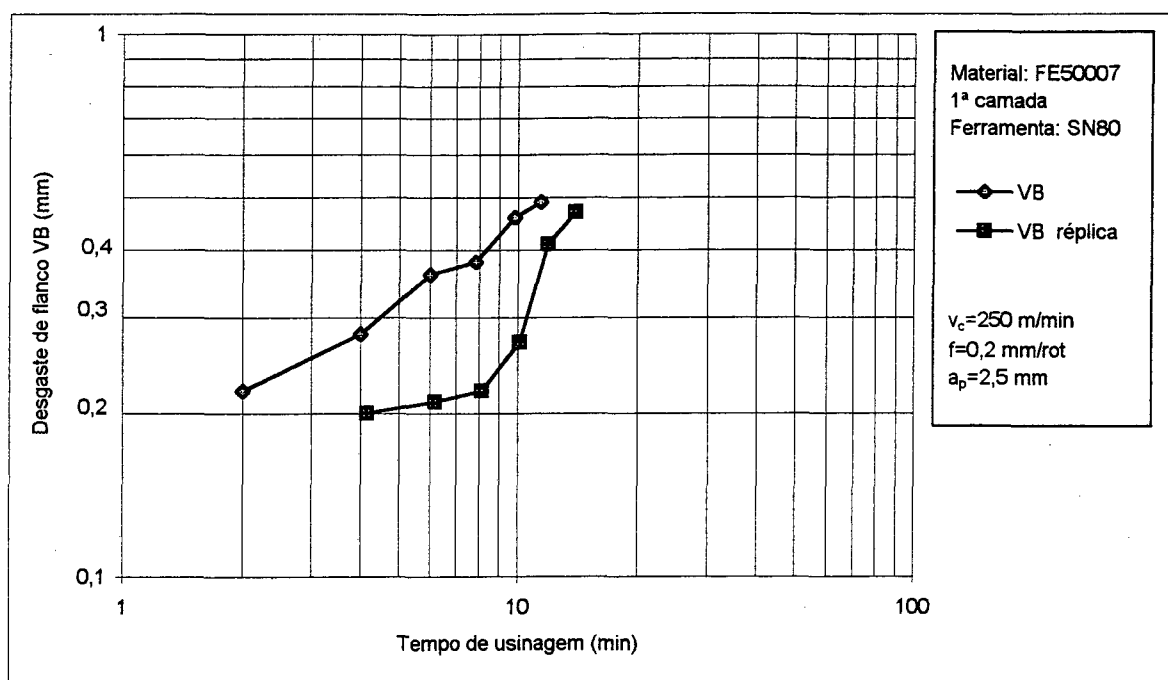


Figura 7.37 - Réplica do experimento na 1ª camada usando a ferramenta SN80 à velocidade de 250 m/min

A figura 7.38 apresenta os resultados correspondentes as mesmas condições e ferramentas descritas no caso anterior, porém, utilizando o VB máximo como critério de desgaste para as ferramentas. Neste caso, observou-se uma menor dispersão, em relação ao caso anterior, entre os valores dos desgastes máximos medidos para a pastilha SN 80. Considera-se que esta menor dispersão possa estar associada a dois fatos principais, que são: maior nitidez da posição marca de desgaste e, conseqüentemente, maior facilidade e segurança na medição da altura dessa marca. A segunda possibilidade refere-se a maior homogeneidade na microestrutura do material

na primeira camada dos dois corpos de prova distintos. Esta última, a mais remota das duas possibilidades.

Ao finalizar esta análise pode-se afirmar que um número significativo de experimentos foi realizado para investigar a validade e a dispersão dos resultados obtidos nesses experimentos. Conforme apresentado, em alguns casos foram constatadas dispersões que de certa forma podem ser consideradas normais neste tipo de pesquisa, dado o número e a complexidade das variáveis. Considera-se que num ambiente industrial essas variações serão, via de regra, maiores que as aqui constatadas. Uma das variáveis alvo no nosso caso foi, sem dúvida, a heterogeneidade do material, mostrada e discutida no capítulo 6 deste trabalho. Uma análise utilizando métodos estatísticos é recomendável para aprofundar esse estudo, pois do contrário o número de experimentos a serem realizados se torna muito grande e oneroso, além de dificultar o relacionamento entre as variáveis e a própria interpretação dos resultados. Na continuidade dessas investigações recomenda-se focar a microestrutura do próprio ferro fundido, assim como as características metalúrgicas e a qualidade (integridade) dos gumes das ferramentas.

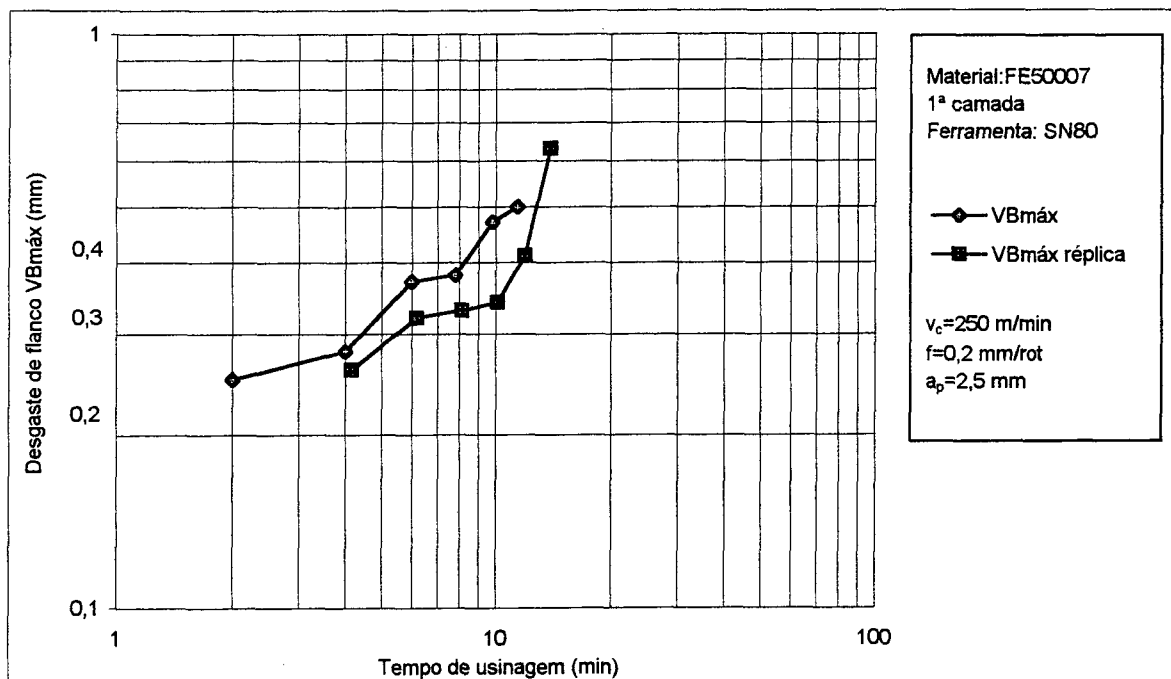


Figura 7.38 - Réplica do experimento na 1ª camada usando a ferramenta SN80 e à velocidade de 250 m/min

## 7.7 - Medição da Força de Corte e de Avanço - Determinação da Força Específica de Corte

Utilizando-se um dinamômetro da marca Kistler, cuja especificação encontra-se no anexo I, efetuaram-se as medições das forças de corte e de avanço do ferro fundido FE-50007 e do aço ABNT 1045. As medições foram realizadas mantendo-se inalterados a velocidade e a profundidade de corte, alterando apenas o avanço. A força específica de corte foi medida e determinada com a finalidade de utilizá-la como parâmetro de comparação da usinabilidade dos dois materiais em questão. Para o ferro fundido nodular utilizou-se a pastilha de metal duro SNMA 120408UM da classe ISO K20 (GC3015) e para o aço ABNT 1045 utilizou-se a pastilha SCMT 120408UM (GC4025). Assim, partiu-se da premissa de que os dois materiais foram usinados nas mesmas condições e, portanto, os resultados foram utilizados com segurança nessa comparação.

### 7.7.1- Forças obtidas para o ferro fundido

Os resultados obtidos para o referido ferro fundido nodular são apresentados na tabela 7.4 e nas figuras 7.39, 7.40, 7.41 e 7.42, e representam a média correspondente a três medições realizadas para cada avanço, em cada camada.

Tabela 7.4 - Forças de corte e forças de avanço para o ferro fundido nodular:

Avanço f (mm)	Força de corte (N)			Força de avanço (N)		
	1ª camada	2ª camada	3ª camada	1ª camada	2ª camada	3ª camada
0,16	700	650	670	525	480	525
0,25	920	890	895	590	565	550
0,40	1260	1235	1245	715	680	675
0,55	1575	1550	1505	800	790	765
0,80	2110	2115	2115	905	885	880

A partir dos resultados anteriormente apresentados pode-se extrair as seguintes e importantes conclusões: a força de corte encontra-se sempre num patamar maior do que a força de avanço, numa proporção de 1,5:1 para os avanços menores e 2:1 para os avanços maiores. Esta tendência tem sido constatada por outros pesquisadores e para outros materiais. A heterogeneidade, em termos de microconstituintes, macro e micro dureza, inicialmente detectada no material, quando da sua análise, não é suficientemente marcante a ponto de produzir uma variação expressiva tanto na força de corte quanto na força de avanço. Isto significa que para as três camadas do material a variação máxima da força, tanto de corte quanto de avanço, atingiu apenas 7%, figura 7.42, considerando um mesmo avanço. A dispersão encontrada sobre os valores individuais, os quais geraram a tabela 7.4, também foi pequena, ou seja, inferior a 5% e, por isto, desconsiderada na presente análise. A força específica de corte  $K_{c1.1}$  (equação 2 do capítulo 1), segundo o método de Kienzle [15], vale 949 N/mm<sup>2</sup> para a primeira camada, 996 N/mm<sup>2</sup> para a segunda e 928 N/mm<sup>2</sup> para a terceira, portanto, uma diferença máxima na ordem de 7% entre as camadas dois e três. O expoente (1-mc) da equação de Kienzle tem os seguintes valores respectivos: 0,68; 0,74 e 0,69. Vale recordar que a primeira e a segunda camadas possuem o maior valor de microdureza Vickers, respectivamente, 298 e 242 HV, contra 223 na terceira, fato que caracteriza uma certa coerência entre a dureza dessas camadas e as forças específicas de corte.

### 7.7.2 – Forças de usinagem obtidas para o aço

Os resultados obtidos nos experimento efetuados com o aço 1045 estão na tabela 7.5, a qual fornece a força de corte e a força de avanço. O gráfico para este caso está representado na figura 7.43.

Tabela 7.5 - Força de corte e força de avanço para o aço ABNT 1045.

f (mm)	Força de corte ( $F_c$ )	Força de avanço ( $F_f$ )
0,16	810	500
0,25	1230	650
0,40	1930	980
0,55	2580	1250



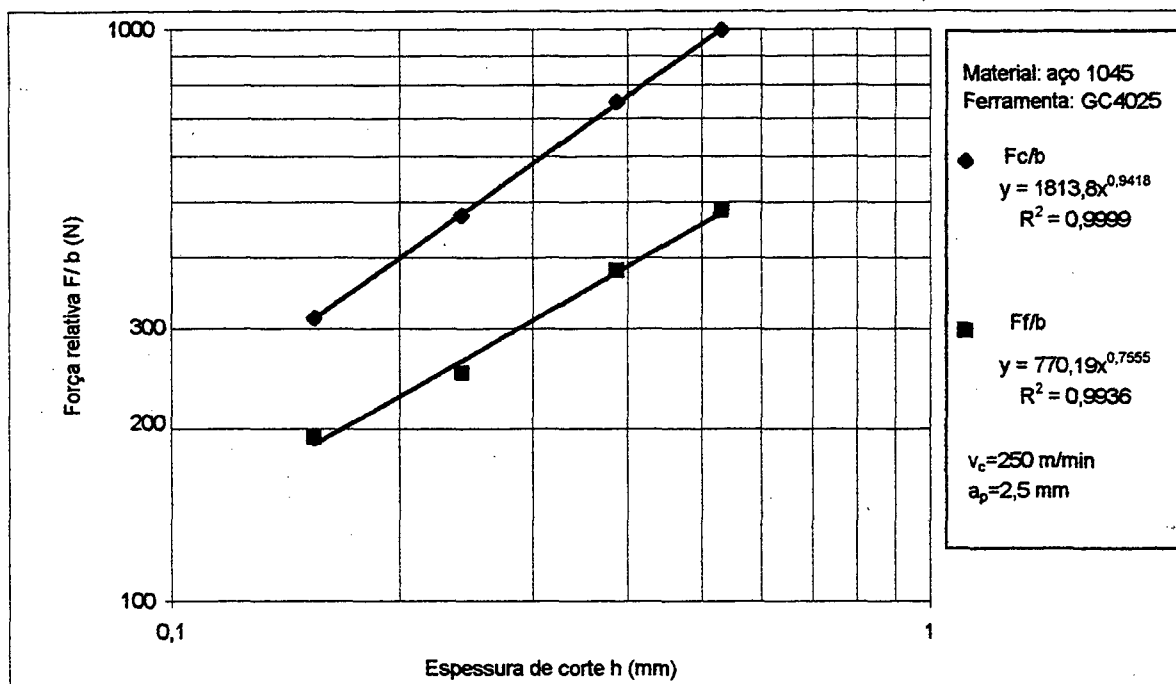


Figura 7.43 - Força de corte e força de avanço para o aço 1045

Os resultados anteriormente expostos permitem apresentar as seguintes conclusões: como no caso do ferro fundido, a força de corte está situada num patamar superior ao da força de avanço, sendo da ordem de 62% maior para o menor avanço e aproximadamente 50% maior para os demais avanços utilizados. A força específica de corte para o aço é de  $1813 \text{ N/mm}^2$  e o expoente da equação de Kienzle de 0,94. Isto significa que a força específica de corte para o aço é 49% maior em relação a terceira camada e 45% maior em relação a segunda camada. Este fato implica num maior dispêndio de energia, nos mesmos percentuais referidos, para a usinagem do aço ABNT 1045.

## 7.8 - Comparação entre a Usinabilidade do Ferro Fundido FE-50007 e a do Aço ABNT 1045

Para estabelecer a comparação entre a usinabilidade do ferro fundido FE-50007 e a do aço ABNT 1045 foram utilizados três parâmetros de referência: o desgaste de

flanco das ferramentas, a força específica de corte e a forma do cavaco, cujos resultados serão discutidos a seguir. Inicialmente realizar-se-á a comparação da usinabilidade dos dois materiais utilizando o desgaste de flanco das ferramentas como parâmetro comparativo.

Os ensaios no ferro fundido ABNT FE -50007 se concentraram na verificação do desempenho da pastilha de metal duro revestido GC 3015 (ISO K15). Esta pastilha, recomendada pelo fabricante [21] para a usinagem do citado material, possui uma camada de revestimento de  $Al_2O_3$  sobre uma camada de  $Ti(C,N)$ . A camada de  $Al_2O_3$  agrega uma grande resistência ao desgaste durante a usinagem do ferro fundido, especialmente a altas velocidades de corte. Em todos os ensaios realizados com a pastilha GC3015 na usinagem do ferro fundido, utilizando velocidades de 225, 250 e 280 m/min, verificou-se o melhor desempenho e níveis normais de desgaste, tendo alcançado tempos de usinagem entre 15 e 48 minutos para o critério de desgaste de flanco VB de 0,3 mm.

A título de comparação é mostrado na figura 7.26 o comportamento das pastilhas SN80 (óxido de alumínio), GC4025, GC3015, CC690 e SL100, as duas últimas de nitreto de silício. Observou-se uma vida longa para a pastilha GC3015 e as demais com tempos de usinagem inferior, isto para um mesmo critério VB e mesmo valor de desgaste.

Os ensaios com o aço ABNT 1045 concentraram-se na verificação do desempenho da pastilha de metal duro revestido GC 4025. Esta pastilha, recomendada pelo fabricante [21] para este tipo de material, tem uma camada de  $Al_2O_3$  sobre uma camada de  $Ti(C,N)$ . A camada externa de  $TiN$  proporciona à classe uma cor amarelada. A combinação de um conjunto de camadas resistentes ao desgaste e um substrato enriquecido com cobalto proporciona à pastilha GC 4025 uma excelente combinação de alta resistência ao desgaste, boa tenacidade e segurança contra microlascamentos do gume da ferramenta. Nos ensaios de usinabilidade do aço ABNT 1045 ficou evidente a superioridade da pastilha GC 4025, proporcionando elevados tempos de usinagem para valores relativamente pequenos de desgaste. Esta pastilha (ferramenta) trabalhou na velocidade de 250 m/min. Como exemplo, pode-se citar que na usinagem do aço 1045 esta pastilha usinou durante 50 minutos, tendo atingido um desgaste de flanco VB de apenas 0,2 mm. Já a pastilha GC 4015, também utilizada nesse aço e com a mesma velocidade de 250 m/min, usinou durante 35 minutos para atingir um

desgaste VB de 0,26 mm, figura 7.26. Deve-se mencionar novamente que este trabalho não tinha a pretensão de estudar com profundidade a usinabilidade do citado aço e sim buscar parâmetros iniciais que possibilitassem comparar a sua usinabilidade com a do ferro fundido em questão.

A título de comparação a pastilha GC 4025 foi utilizada na usinagem do ferro fundido nodular e neste caso ela teve um baixo desempenho, com o desgaste VB aumentando rapidamente para 0,3 mm em apenas 8 minutos de usinagem. Esta tendência de resultado foi constatada em três experimentos realizados na velocidade de 250 m/min, na primeira e segunda camadas do material.

Estes resultados, anteriormente descritos, permitem apresentar as seguintes e importantes conclusões quanto à usinabilidade dos dois materiais, utilizando o desgaste de flanco como critério comparativo: se compararmos a pastilha GC 3015 utilizada no ferro fundido com a pastilha GC 4025 utilizada no aço, ambas trabalhando nas mesmas condições de corte, conclui-se que a usinabilidade do aço foi melhor do que a do ferro fundido, pois enquanto a primeira usinou apenas 33 minutos no ferro fundido para atingir um desgaste VB de 0,30 mm a segunda usinou 50 minutos no aço e atingiu um desgaste de apenas 0,20 mm. Conclusão parecida é obtida em relação aos resultados encontrados com a pastilha GC 4025 aplicada, também, para usinar o ferro fundido. Neste caso a GC 4025 alcançou um desgaste VB de 0,30 mm em apenas 8 minutos de usinagem. Porém, a utilização do desgaste das ferramentas como critério para comparar a usinabilidade dos dois deve ser feita com muita cautela, uma vez que hoje existem ferramentas bastante específicas para a usinagem de cada um desses materiais e, por isto, também proporcionam resultados específicos. Isto significa que se empregarmos a pastilha GC 3015 para usinar o aço e utilizarmos o referido critério de comparação, muito provavelmente concluiremos que a usinabilidade do ferro fundido nodular é melhor que a do aço 1045. Portanto, a aplicação do critério de desgaste das ferramentas para comparar a usinabilidade de materiais exige muita atenção e conhecimento sobre o assunto para possa ser efetuado corretamente, ou seja, sem obter resultados duvidosos.

Por outro lado, utilizando a força específica de corte para comparar a usinabilidade dos dois materiais, conclui-se que a usinabilidade do ferro fundido é melhor que a do aço, uma vez que a força específica de corte para o ferro fundido é da ordem de apenas 50 % em relação a do aço, figura 7.44. Isto significa que para usinar

a mesma quantidade (volume) de material gasta-se 50 % menos energia do que para usinar o ferro fundido.

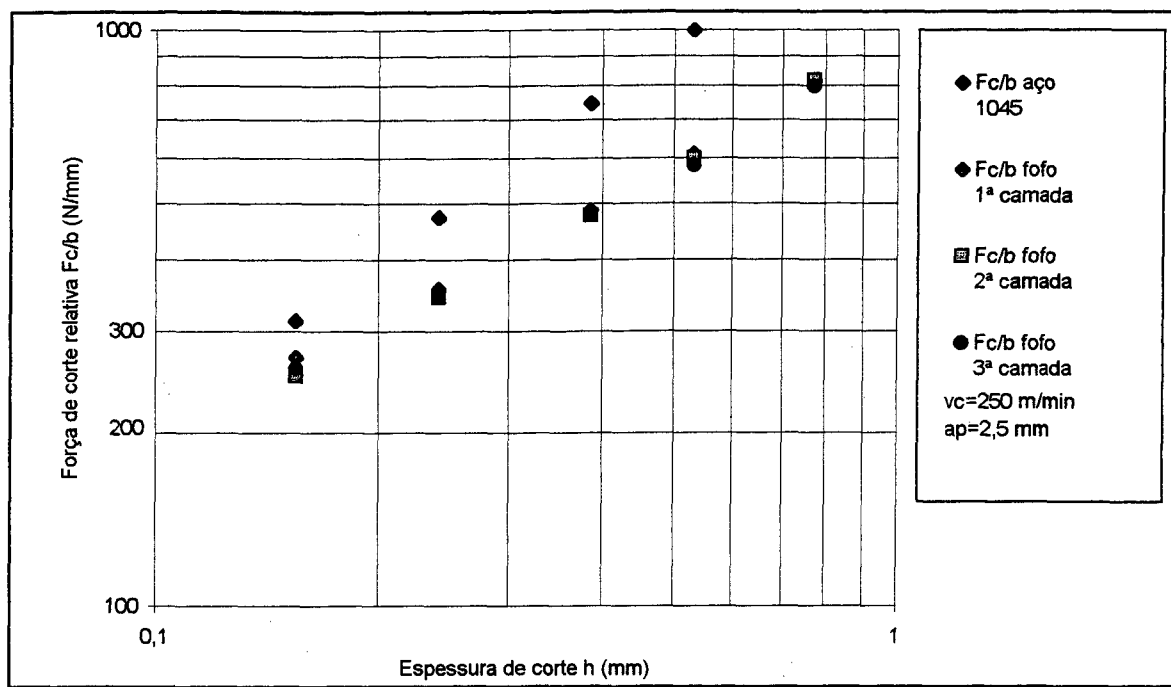


Figura 7.44 - Força de corte para o aço 1045 e para as três camadas do ferro fundido

Finalmente, quanto a forma dos cavacos, temos para o aço 1045 cavacos do tipo contínuo, em formas de fita, helicoidal, espiral ou em vírgula, dependendo da geometria da ferramenta, tipo e forma do quebra-cavaco. Já para o ferro fundido, por ser um material frágil, tem-se por natureza cavacos curtos, em forma de vírgula e, portanto, via de regra, sem grandes problemas durante o processo de usinagem. No caso específico deste trabalho obtiveram-se predominantemente cavacos helicoidais curtos e espirais para o aço, sem maiores danos durante o processo de usinagem. Assim, do ponto de vista deste critério, os dois materiais apresentaram boa usinabilidade. Deve-se ressaltar, no entanto, que sob este critério os aços podem apresentar menor usinabilidade, caso as condições de usinagem, geometria da ferramenta e quebra-cavaco, não seja adequados.

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 8.1 – Conclusões

Inicialmente pode-se concluir que dentre o conjunto de classes de materiais, ou seja, ferramentas testadas para usinar o ferro fundido nodular FE-50007, a mais adequada foi a de metal duro, denominada comercialmente pelo fabricante de GC3015, com dupla camada de revestimento. Esta conclusão está pautada no fato de que essa proporcionou a menor intensidade de desgaste e, conseqüentemente, as maiores vidas para as velocidades utilizadas nos experimentos. As demais, denominadas comercialmente de GC4025, GC4015, CT525, CC690, SL100 e SN80 apresentaram resultados inferiores, os quais foram apresentados no capítulo 7 deste trabalho. Neste conjunto, as duas primeiras são de metal duro com revestimento, a terceira de Cermet, a quarta e a quinta de cerâmica à base de nitreto de silício e a última de cerâmica à base de óxido de alumínio.

Uma segunda conclusão importante quanto à usinagem do acima referido ferro fundido com a ferramenta GC3015 está relacionada com a heterogeneidade da microestrutura deste material, discutida no capítulo 6 e que se mostrou bastante influente sobre o desgaste das ferramentas.

Devido a essa heterogeneidade os corpos de prova do ferro fundido foram divididos e usinados em três camadas distintas, sendo a primeira a externa, a segunda a intermediária, a terceira a do núcleo, cada qual com uma espessura de 7,5 mm, o que corresponde a três passes nos experimentos de torneamento. Cada uma das três camadas foi usinada com três velocidades específicas, a saber: 225; 250 e 280 m/min. Para a velocidade de 225 m/min o tempo de usinagem oscilou entre 35 minutos para a terceira camada e 48 minutos para a primeira camada, o que representa uma diferença de 27%, isto para um desgaste de flanco VB de 0,3 mm. Já para a maior velocidade, 280 m/min, a diferença foi de 19% e situa-se entre a primeira camada, com 13 minutos, e a segunda camada, com 16 minutos. Estes resultados encontram-se na tabela 7.3 e nas figuras. 7.14 e 7.15.

Quanto às velocidades de corte anteriormente referidas e utilizadas para usinar o ferro fundido nodular FE-50007 pode-se afirmar que elas se encontram dentro de uma faixa de valores adequada para aplicação em produção industrial, tendo em vista o tempo de vida que proporcionam e que neste trabalho dependem da camada do corpo de prova.

As velocidades maiores podem ser aplicadas para máquinas modernas e que permitem obter essas velocidades e, as mais baixas, para as máquinas mais antigas e que não possuem esse recurso. No entanto, velocidades acima de 280 m/min particularmente estão descartadas para essa combinação peça-ferramenta, pois proporcionam vidas de ferramenta extremamente baixas, menor que 10 minutos, acarretando muitas paradas de máquina para troca de ferramentas. Por outro lado, velocidades menores que 225 m/min também não são recomendadas devido ao fato de aumentarem demasiadamente o tempo e os custos de usinagem das peças produzidas. No caso do ferro fundido em estudo deve-se considerar também, na determinação da velocidade de corte, a heterogeneidade da microestrutura do material sobre o desgaste das ferramentas e neste particular as figuras 7.14 e 7.15 do capítulo 7 apresentam sua contribuição.

Quanto ao desgaste na ferramenta GC3015, com duplo revestimento, constatou-se que para um desgaste de flanco com VB acima de 0,2 mm existe um grande risco de causar danos profundos nesse revestimento, trazendo como consequência um brusco aumento desse desgaste e a possibilidade do rápido colapso da ferramenta, principalmente nas velocidades mais altas que impõem maior solicitação térmica a mesma.

Passando para a análise do aço carbono ABNT 1045, constatou-se que a ferramenta mais adequada para a sua usinagem, entre as poucas utilizadas, é a GC4025 revestida. Esta constatação deve-se igualmente ao comportamento do desgaste e da vida dessa ferramenta (capítulo 7, figura 7.27). Neste caso utilizou-se apenas a velocidade de corte de 250 m/min, uma vez que não era objetivo deste trabalho estudar com profundidade a usinagem desse aço, e sim buscar parâmetros de referência para comparar a sua usinabilidade com a do ferro fundido nodular com propriedades mecânicas similares. Na citada velocidade a ferramenta usinou 50 minutos e atingiu um desgaste de apenas 0,2 mm.

Para estabelecer a comparação entre a usinabilidade dos dois materiais utilizou-se como critério o desgaste das ferramentas, a força específica de corte e a forma dos cavacos.

Pelo primeiro critério, concluiu-se que em relação as ferramentas utilizadas nos dois materiais o aço ABNT 1045 apresenta uma usinabilidade superior à do ferro fundido nodular (ver seção 7). No entanto, este resultado limita-se ao conjunto de ferramentas em questão e carece de pesquisas complementares para ampliar o leque de informações. Por sua vez, pelo critério da força específica de corte, o ferro fundido apresenta uma usinabilidade melhor que a do aço, pois para o primeiro material essa força específica é da ordem de até 50% menor, o que reduz, na mesma ordem de grandeza, o consumo de energia para realizar a sua usinagem. Utilizando a forma de cavacos como critério pode-se dizer que o ferro fundido nodular, por ser um material mais frágil que o aço e com a presença de nódulos de grafita, não apresenta problemas com cavacos longos, o que nem sempre é o caso do aço, pois esse necessita de maiores cuidados com as condições de corte, geometria da ferramenta e quebra-cavacos para não proporcionar cavacos longos e inconvenientes para os processos de usinagem.

Ao finalizar a apresentação das principais conclusões deste trabalho deve-se destacar ainda que a heterogeneidade da microestrutura do ferro fundido não foi detectada com muita nitidez nas forças de corte, uma vez que a variação máxima das forças foi de apenas 7% entre as três camadas dos corpos de prova.

## **8.2 - Recomendações para Futuros Trabalhos**

Apesar das pastilhas cerâmicas serem recomendadas para a usinagem de ferro fundido cinzento, neste trabalho elas não se mostraram adequadas para usinar o ferro fundido nodular. Os testes efetuados com as pastilhas de óxido de alumínio puro e de nitreto de silício apresentaram um desgaste muito rapidamente. Deve-se salientar que tanto a velocidade de corte como a rigidez da máquina não estavam de acordo com o exigido para a utilização dessas pastilhas cerâmicas. Estudar os mecanismos que causaram esse rápido desgaste é de grande importância teórica e prática.

Recomenda-se, no futuro, estudar a usinabilidade de outros ferros fundidos de fundição contínua, pois há uma grande gama destes materiais e seria interessante, por motivos econômicos, comparar a usinabilidade destes materiais entre si.

Um outro trabalho de pesquisa à ser realizado futuramente seria a usinabilidade em termos de acabamento superficial. Para isto seriam usadas ferramentas próprias para acabamento superficial e seria mediada a rugosidade superficial dos corpos de prova.

Também, recomenda-se realizar o estudo detalhado e sistemático da influência da densidade dos nódulos de grafita e dos mais microconstituintes nas diversas camadas do corpo de prova sobre o desgaste das ferramentas e sobre as forças de corte.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **ANGUS, H. T. Cast iron: physical and engeneering properties. BUTTERWORTHS, 1981.**
- [2] **ASM-Metals Handbook. Properties and selection: Iron and Steels. Ohio: Committee on ductile iron, 1978. 9th edition. Vol. 1.**
- [3] **BOEHS, L.; BORGES, R. Metodologia do ensaio de usinagem para torneamento. Florianópolis: Publicação interna GRUCON, 1980. 25 p.**
- [4] **BOEHS, L. Programa interno de treinamento de recursos humanos. Campo Limpo, SP. KRUPP Metalúrgica, 1995.**
- [5] **BOEHS, L. Influência do sulfeto de manganês na usinabilidade do ferro fundido maleável preto ferrítico. Florianópolis, 1979. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 105 p.**
- [6] **BRINKSMEIER, E.; BARTSCH, S. Material characteristics and load types determine wear mechanisms. West Germany, 1988. Anais do CIRP.**
- [7] **BROWN, J.R. The continuous cast irons process. The Foundryman, 1995.**
- [8] **CONSALTER, A. Arquivos de dados tecnológicos de usinagem para a determinação automática de condições de corte em tornos com comando numérico. Florianópolis, 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. 131 p.**
- [9] **CLARK; ROEBUCK. Extending aplication areas for titanium carbonitride Cermets. Refractory Metals & Hard Materials, 1991.**

- [10] EZUGWU, E. O. **Evaluation of Cermet cutting tools materials when machining G-17 cast iron**. Philadelphia: Journal of the Tribologists and Lubrication Engineers, 1992.
- [11] FATAHALLA, N.; BAH, S. **Metallurgical parameters, mechanical properties and machinability of ductile cast iron**. Chapman & Hall, 1996.
- [12] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Blucher, 1977.
- [13] ISO 3685. **Internacional Organization for Standardization tool life testing with single point turning tools**. Switzerland: 1977.
- [14] KRALL, H. **Acontinuous casting of gray iron sections**. Foundry, 1965.
- [15] KÖNIG, W. **Tecnologia da fabricação**. AACHEN, 1981. Tradução realizada pelo Prof. Dr. Walter I. Weingaertner.
- [16] KÖNIG, W.; FRITSCH, R.; KAMMERMEIER, D. **New approaches to characterizing the performance of coated cutting tools**. Annals of the CIRP, 1992. Vol. 41.
- [17] Manual técnico FUCO. **Perfis de fundição contínua**. Joinville: Indústria de fundição tupy, 1998.
- [18] MARGERIE, J. C. **Facteurs metalurgiques de l'usinabilité des pièces en fonte**. Fonderie, nº 303, 1971.
- [19] PEYRE, J.P.; VINTERHOLLER, O. **Revestidas por CVD ou PVD as ferramentas têm vida melhor**. Revista Máquinas e Metais, 1994.
- [20] RICHARDS, N. ; ASPINWALL, D. **Use of ceramic tools for machining nickel based alloys**. Int.J. Mach. Tools Manufacturing, 1989.

- [21] SANDVIK COROMANT. Catálogo de ferramentas para torneamento. SANDVIK COROMANT, 1995.
- [22] SIMONIN, S. P. **Mesure de l'usinabilité des malleables**. Fonderie nº356, 1976.
- [23] SOUZA, A. B. S.; CASTELO BRANCO, C. H. **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: IPT, 1977.
- [24] SPK FELDMULLE. Catálogo de ferramentas cerâmicas, 1983.
- [25] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995. 249p.
- [26] TONSHOFF, H.K.; WOBKER, H.G.; CASSEL, C. 1994.
- [27] Tool and manufacturing engineers handbook. Dearborn: Society of manufacturing engineers, 1978. 4th edition. Vol.1.
- [28] WALTON, C.N. **Iron Castings Handbook**. Gray and Ductile Iron Founders Society, 1971.
- [29] WEINGAERTNER, W. L. ; SCHROETER, R. B.; ZEILMANN, R. P. **Relatório interno LMP – calibração de plataformas piezelétricas**. Florianópolis: Publicação interna LMP, 1997.

## **APÊNDICE I**

### **EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS**

**1) Torno IMOR**

**Tipo: P400**

**Fabricante: Indústrias ROMI S.A**

**Distância entre pontas: 1000 mm**

**Altura das pontas: 250 mm**

**Diâmetro máximo torneável: 430 mm**

**Potência: 15 CV**

**2) Torno ROMI**

**Tipo: I-45**

**Fabricante: Indústrias ROMI S.A.**

**Distância entre pontas: 2000 mm**

**Altura das pontas: 350 mm**

**Diâmetro máximo torneável: 600 mm**

**Potência: 15 CV**

**3) Ferramenta de corte:**

**Ferramenta: inserto intercambiável de metal duro**

**Fabricante: Sandvik Coromant**

**Classe do fabricante: GC3015**

**Classe ISO: K20**

**Espessura: 4,7 mm**

**Nº de gumes: 8**

**Código da geometria: SNMA120408**

**Revestimento: TiN**

Porta ferramenta:

Fabricante: Sandvik Coromant

Modelo: PSBNR2525M12

Ângulo de saída:  $\gamma = -6^\circ$

Ângulo de inclinação:  $\lambda = -6^\circ$

Ângulo de direção do gume:  $\chi = 75^\circ$

4) Ferramenta de corte:

Ferramenta: inserto intercambiável de Cermet

Fabricante: Sandvik Coromant

Classe do fabricante: CT525

Classe ISO: P10

Formato: quadrado

Espessura: 4,7 mm

Nº de gumes: 4

Código da geometria: SCMT09T308-UF

Porta ferramenta:

Fabricante: Sandvik Coromant

Modelo: SSBCR2525M12

Ângulo de saída:  $\gamma = 0^\circ$

Ângulo de inclinação:  $\lambda = 0^\circ$

Ângulo de direção do gume:  $\chi = 75^\circ$

5) Ferramenta de corte:

Ferramenta: inserto intercambiável de metal duro

Fabricante: Sandvik Coromant

Classe do fabricante: GC4025

Classe ISO: K20

Formato: quadrado

Espessura: 4,7 mm

Nº de gumes: 4

Código da geometria: SCMT120408UM

Revestimento:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti (C, N)}$

Porta ferramenta:

Fabricante: Sandvik Coromant

Modelo: SSBCR2525M12

Ângulo de saída:  $\gamma = 0^\circ$

Ângulo de inclinação:  $\lambda = 0^\circ$

Ângulo de direção do gume:  $\chi = 75^\circ$

#### 6) Ferramenta de corte:

Ferramenta: inserto intercambiável de metal duro

Fabricante: Sandvik Coromant

Classe do fabricante: GC4015

Classe ISO: K15

Formato: quadrado

Espessura: 4,7 mm

Nº de gumes: 4

Código da geometria: SCMT120408UR

Revestimento:  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$

Porta ferramenta:

Fabricante: Sandvik Coromant

Modelo: SSBCR2525M12

Ângulo de saída:  $\gamma = 0^\circ$

Ângulo de inclinação:  $\lambda = 0^\circ$

Ângulo de direção do gume:  $\chi = 75^\circ$



## 7) Ferramenta de corte:

Ferramenta: inserto intercambiável de cerâmica

Fabricante: Sandvik Coromant

Classe do fabricante: CC690

Classe ISO: K10

Formato: quadrado

Espessura: 4,7 mm

Nº de gumes: 8

Código da geometria: SNGN120408T02520

Constituição: nitreto de sílcio puro

Porta ferramenta:

Fabricante: Sandvik Coromant

Modelo: CSRNR2525M12IC

Ângulo de saída:  $\gamma = -6^\circ$

Ângulo de inclinação:  $\lambda = -6^\circ$

Ângulo de direção do gume:  $\chi = 75^\circ$

## 8) Ferramenta de corte:

Ferramenta: inserto intercambiável de óxido de alumínio

Fabricante: SPK Feldmulle

Classe do fabricante: SN80

Formato: quadrado

Espessura: 8,0 mm

Nº de gumes: 8

Constituição: óxido de alumínio puro

Porta ferramenta:

Fabricante: Sandvik Coromant

Modelo: CSRNR2525M12IC

Ângulo de saída:  $\gamma = -6^\circ$

Ângulo de inclinação:  $\lambda = -6^\circ$

Ângulo de direção do gume:  $\chi = 75^\circ$

**9) Plataforma dinamométrica de três componentes**

Sistema de medição: cristais piezoelétricos

Fabricante: Kistler Instruments – Suíça

Modelo: 9257D

Tipo: SN 6137

**10) Microscópio para medição de ferramentas**

Fabricante: Leitz Wetzlar – Alemanha

Ampliação: 20x e 30x

Resolução dos tambores micrométricos: 0,01 mm

Resolução do giro da placa: 1'

**11) Durômetro Brinell**

Marca: Heckert

Tipo: HPO250 (Brinell e Vickers)

**12) Micro-durômetro Vickers**

Fabricante: Shimadzu Japão

Modelo: HMV 2000

**13) Paquímetro**

Fabricante: Mitutoyo-Japão

Faixa de indicação: 0 a 300 mm

Resolução: 0,05 mm

**14) Microscópio eletrônico de varredura:**

Marca: Philips

Modelo: XL30

## APÊNDICE II

## PLANILHAS DOS ENSAIOS

Pastilha: GC3015-K10 Material: FOFO $v_c=250$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm								
1ª CAMADA			2ª CAMADA			3ª CAMADA		
t(min)	VB ( )	VBmáx (mm)	t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
4,25	0,15		2,0	0,10		2,80	0,14	
8,28	0,18		3,42	0,12		5,38	0,14	
12,10	0,19		5,42	0,13		7,76	0,16	
16,23	0,22		6,52	0,13		10,56	0,18	
20,16	0,24		9,42	0,14		13,15	0,18	
23,88	0,25		11,42	0,15		15,55	0,19	0,26
28,16	0,30		12,92	0,15		18,35	0,24	0,35
			16,24	0,16		20,95	0,30	0,45
			19,24	0,18				
			22,60	0,18				
			25,68	0,19				
			28,56	0,21				
			32,13	0,34				
REPLICA								
t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)						
3,46	0,05							
6,72	0,06							
9,70	0,08							
13,08	0,08							
16,18	0,09							
19,81	0,09							
23,23	0,11							
26,63	0,17							
30,28	0,34							

Pastilha: SL100 Material: FOFO $v_c=250$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm			Pastilha: SN80 Material: FOFO $v_c=250$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm		
1ª CAMADA			1ª CAMADA		
t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
2,0	0,48	0,48	2,0	0,22	0,25
			4,0	0,28	0,28
			6,0	0,36	0,37
			7,82	0,38	0,38
			9,82	0,46	0,47
			11,43	0,49	0,50
			REPLICA		
			4,16	0,20	0,26
			6,17	0,21	0,32
			8,13	0,22	0,33
			10,13	0,27	0,34
			11,91	0,41	0,41
			13,91	0,47	0,63

Pastilha: GC4015UR Material: FOFO $v_c=250$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm			Pastilha: GC4015UM Material: FOFO $v_c=250$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm		
2ª CAMADA			2ª CAMADA		
t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
2,0	0,15		2,0	0,14	
3,6	0,17		3,81	0,15	
5,6	0,19		5,81	0,16	
6,9	0,20		7,0	0,17	
8,9	0,21		8,7	0,18	
9,9	0,21		9,9	0,18	
11,4	0,23		11,9	0,20	
13,4	0,25		13,6	0,20	
14,7	0,26		15,6	0,20	
17,8	0,32		17,0	0,25	
			19,2	0,36	

Pastilha:GC3015-K10 Material: FOFO $v_c = 280 \text{ m/min}$ $f = 0,2 \text{ mm/rot}$ $a_p = 2,5 \text{ mm}$								
1ª CAMADA			2ª CAMADA			3ª CAMADA		
t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
2,92	0,12		2,45	0,15		2,5	0,12	
5,65	0,16		4,73	0,17		2,85	0,15	
8,23	0,18		6,88	0,18		4,98	0,16	
11,09	0,23		9,32	0,20		7,48	0,18	
13,84	0,31		11,59	0,21		9,8	0,19	
REPLICA			13,72	0,22		11,9	0,21	
t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	16,85	0,31		14,4	0,32	
3,56	0,16		REPLICA					
6,94	0,20		t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)			
10,14	0,26		3,11	0,16				
14,14	0,29		5,94	0,18				
			8,67	0,19				
			11,60	0,23				
			14,35	0,24				
			16,93	0,33				

Pastilha: GC4025-K20, P25

Material: FOFO

 $v_c=250$  m/min $f=0,2$  mm/rot $a_p=2,5$  mm

1ª CAMADA			2ª CAMADA		
t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
2,0	0,11		3,6	0,17	
4,34	0,17		6,98	0,30	0,40
6,34	0,24		8,43	0,38	0,54
8,45	0,36				
REPLICA					
2,0	0,15				
4,27	0,17				
6,27	0,22				
8,32	0,30				

Pastilha: GC4025-K20, P25

Material: aço 1045

 $v_c=250$  m/min $f=0,2$  mm/rot $a_p=2,5$  mm

Pastilha: GC4015UR

Material: aço 1045

 $v_c=250$  m/min $f=0,2$  mm/rot $a_p=2,5$  mm

t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
1,5	0,10		1,55	0,14	
2,88	0,11		3,32	0,19	
4,14	0,13		5,67	0,22	
6,36	0,13		7,56	0,22	
8,89	0,14		10,54	0,23	
11,84	0,14		13,08	0,23	
14,36	0,14		15,15	0,24	
16,43	0,17		16,81	0,24	
18,10	0,17		19,78	0,24	
21,02	0,17		22,34	0,25	
23,50	0,18		24,40	0,25	
27,15	0,18		26,07	0,25	
32,38	0,19		30,42	0,26	
35,92	0,20		35,28	0,26	
41,21	0,20				
44,84	0,20				
50,09	0,20				



Pastilha: GC4025-K20, P25 Material: FOFO $v_c=250$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm					
1ª CAMADA			2ª CAMADA		
t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
2,0	0,11		3,6	0,17	
4,34	0,17		6,98	0,30	0,40
6,34	0,24		8,43	0,38	0,54
8,45	0,36				
REPLICA					
2,0	0,15				
4,27	0,17				
6,27	0,22				
8,32	0,30				

Pastilha: GC3015-K10 Material: FOFO $v_c=280$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm								
1ª CAMADA			2ª CAMADA			3ª CAMADA		
t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
2,92	0,12		2,45	0,15		2,5	0,12	
5,65	0,16		4,73	0,17		2,85	0,15	
8,23	0,18		6,88	0,18		4,98	0,16	
11,09	0,23		9,32	0,20		7,48	0,18	
13,84	0,31		11,59	0,21		9,8	0,19	
			13,72	0,22		11,9	0,21	
			16,85	0,31		14,4	0,32	

REPLICA			REPLICA		
t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
3,56	0,16		3,11	0,16	
6,94	0,20		5,94	0,18	
10,14	0,26		8,67	0,19	
14,14	0,29		11,60	0,23	
			14,35	0,24	
			16,93	0,33	

Pastilha: SL100 Material: FOFO $v_c=250$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm			Pastilha: SN80 Material: FOFO $v_c=250$ m/min $f=0,2$ mm/rot $a_p=2,5$ mm		
1ª CAMADA			1ª CAMADA		
t(min)	VB (mm)	VBmáx (mm)	t (min)	VB (mm)	VBmáx (mm)
2,0	0,48	0,48	2,0	0,22	0,25
			4,0	0,28	0,28
			6,0	0,36	0,37
			7,82	0,38	0,38
			9,82	0,46	0,47
			11,43	0,49	0,50
			REPLICA		
			4,16	0,20	0,26
			6,17	0,21	0,32
			8,13	0,22	0,33
			10,13	0,27	0,34
			11,91	0,41	0,41
			13,91	0,47	0,63